



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**FABRÍCIA GLADYS FERNANDES DA SILVA ROSSATO**

**BIOELETRICIDADE COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL NA  
INDÚSTRIA DE CELULOSE**

**LIMEIRA  
2019**

**FABRÍCIA GLADYS FERNANDES DA SILVA ROSSATO**

**BIOELETRICIDADE COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL NA  
INDÚSTRIA DE CELULOSE**

Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia da  
Universidade Estadual de Campinas, como parte  
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de  
Doutora em Tecnologia, na Área de Ambiente.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ieda Geriberto Hidalgo  
Co-orientador: Prof. Dr. Andres Ignacio Susaeta Larrain

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
TESE DEFENDIDA PELA ALUNA FABRÍCIA GLADYS  
FERNANDES DA SILVA ROSSATO E ORIENTADA  
PELA PROF.<sup>A</sup>. DR.<sup>A</sup>. IEDA GERIBERTO HIDALGO, CO-  
ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRES IGNACIO  
SUSAETA LARRAIN

LIMEIRA  
2019

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3856-3901>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

R733b Rossato, Fabrícia Gladys Fernandes da Silva, 1972-  
Bioeletricidade como alternativa energética sustentável na indústria de  
celulose / Fabrícia Gladys Fernandes da Silva Rossato. – Limeira, SP : [s.n.],  
2019.

Orientador: Ieda Geriberto Hidalgo.  
Coorientador: Andres Ignacio Susaeta Larrain.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Tecnologia.

1. Indústria de celulose. 2. Bioeletricidade. 3. Análise envoltória de dados.  
4. Externalidades (Economia). I. Hidalgo, Ieda Geriberto, 1976-. II. Susaeta,  
Andres. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV.  
Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Sustainability in the production of bioelectricity in the cellulose industry

**Palavras-chave em inglês:**

Cellulose industry

Bioelectricity

Data envelopment analysis

Externalities (Economics)

**Área de concentração:** Ambiente

**Titulação:** Doutora em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Ieda Geriberto Hidalgo [Orientador]

Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro

Marli de Freitas Gomes Hernandez

Pedro Henrique Melo Albuquerque

Leandro Sauer

**Data de defesa:** 27-02-2019

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Abaixo se apresentam os membros da Comissão Julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Doutora em Tecnologia na área de concentração em Ambiente, a que submeteu a aluna Fabrícia Gladys Fernandes da Silva Rossato, em 27 de fevereiro de 2019 na Faculdade de Tecnologia- FT/ Unicamp, em Limeira/SP.

### **Banca Examinadora:**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ieda Geriberto Hidalgo**  
Presidente da Comissão Julgadora

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro**  
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Faculdade de Tecnologia

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marli de Freitas Gomes Hernandez**  
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Faculdade de Tecnologia

**Prof. Dr. Pedro Henrique Melo Albuquerque**  
Universidade de Brasília - UNB

**Prof. Dr. Leandro Sauer**  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/ Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na secretaria do Programa da Unidade.

## AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma tese de doutorado é um produto coletivo e multidisciplinar, no entanto a redação, a responsabilidade pelos resultados é exclusivamente individual. Nesta tese, várias pessoas contribuíram para a conclusão. A todas as pessoas que passaram por essa fase de aprendizado, sou eternamente grata. Não poderia citar um nome, que não estaria sendo justa com cada um dos que passaram poucos minutos, assim como aquelas que passaram dias ao meu lado. Aos que me ouviram, aos que me questionaram, aos que me corrigiram, e contribuíram de alguma forma para a conclusão deste longo trabalho, deixo minha infinita gratidão e o meu muito obrigada.

A minha orientadora, Profa. Dra. Ieda Geriberto Hidalgo, a quem tive a oportunidade de conhecer e admirar. Sua conduta que está pautada em trabalho, estudos e muita dedicação. Creio ter sido esta experiência de vida que a levou ser extremamente generosa comigo ao longo da construção desta tese de doutorado.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Andres I. Susaeta Larrain, que incansavelmente, estava pronto para ajudar, orientar e coordenar essa tese. O exemplo de mestre que levarei para a minha construção profissional.

À Universidade da Florida pelo convite para participar do Laboratório de Política de Recursos Naturais como pesquisador/visitante de doutorado na Escola de Recursos Florestais e Conservação (SFRC), em Gainesville FL. Oportunidade concedida pelo Prof. Dr. Damian C. Adams, coordenador do curso, e Prof. Dr. Andres I. Susaeta Larrain.

À Banca Examinadora, meus agradecimentos e respeito.

À Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS, diretores, professores, e técnicos administrativos, que em conjunto me proporcionaram essa oportunidade de aperfeiçoamento profissional, A todos vocês, minha gratidão.

Aos meus filhos, Felipe, Jorge, Alexandre e Matteo, que estão ao meu lado e, mesmo na minha ausência, tenho certeza que serei um exemplo para eles de determinação e confiança. Amor incondicional...

Ao Cicero, meu marido e parceiro de muitas jornadas, que em todos os momentos de elaboração desta tese, me fez acreditar que seria capaz de vencer este desafio, mesmo quando eu mesma não acreditava mais que seria capaz. Com seu amor, sua abdicção e apoio, eu consegui chegar até o final. Por isso te agradeço eternamente e te dedico cada página aqui escrita. A ti, meu amor NTS.

## RESUMO

Esta pesquisa aborda discussões sobre a indústria de celulose e a importância do setor elétrico para o crescimento econômico, social e desenvolvimento ambiental de um país. A geração de bioeletricidade é um fator significativo para o desenvolvimento sustentável. Assim, a utilização da bioeletricidade de biomassa de resíduos florestais e licor negro, novo *player* de negócio das indústrias de celulose, pode auxiliar no desenvolvimento sustentável da região onde estão inseridas. O potencial de geração de energia a partir de fontes renováveis nos próximos anos é bastante promissor, e neste estudo está associado à demanda crescente do mercado mundial por celulose. As indústrias de celulose em suas novas plantas de produção são consideradas biorrefinarias, pois utilizam a biomassa e subprodutos florestais para gerar energia. A bioeletricidade gerada na produção de celulose é uma alternativa de energia renovável e pode influenciar muitos aspectos da sociedade, do meio ambiente e da economia do país. As externalidades são impactos impostos à sociedade e não contabilizados pelos produtores ou consumidores. Elas podem ser classificadas como positivas ou negativas, dependendo de como a ação privada irá influenciar o bem-estar social, a economia ou o ambiente. O objetivo desta tese foi avaliar a eficiência das indústrias de celulose, registradas na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), na produção de bioeletricidade como alternativa energética sustentável e, identificar as externalidades que podem influenciar indiretamente nessa eficiência. A metodologia faz uso da Análise Envolvente de Dados (DEA – sigla em inglês de *Data Envelopment Analysis*), para criar índices e *rankings* de eficiência na produção de bioeletricidade das indústrias de celulose dos Produtores Independentes de Energia (PIE) e Autoprodutoras de Energia (APE) com capacidade instalada superior a 100.000,00 Watts. Para o desempate das *Decision Making Units* (DMUs) foi calculado o índice composto que consiste em obter a média ponderada e normalizada, por meio do valor máximo, das eficiências padrão e invertida. Finalmente, para análise pós eficiência foi aplicada a regressão linear truncada, para identificar como externalidades influenciam de forma indireta o comportamento desta eficiência. Desta forma, a análise de pós eficiência aproxima os indicadores da realidade empírica das indústrias, uma vez que, elas não controlam plenamente todos os fatores que interferem nos níveis produtivos. A partir dos dados e informações locais, evidencia-se que as indústrias florestais e de celulose trouxeram benefícios para a população, como emprego, aumento de renda, aumento do fluxo de dinheiro no comércio local. No entanto, destaca-se o impacto da industrialização para o meio ambiente e o setor público que atende à população que gera esses impactos locais. Cabe aos responsáveis pelo planejamento dos municípios reduzir os problemas de infraestrutura e minimizar os impactos ambientais. Em suma. O uso do DEA combinado com as técnicas de índice composto e regressão linear truncada proporcionaram resultados satisfatórios que são importantes para sugestões de políticas públicas que possam contribuir para o desenvolvimento e incentivo na produção de bioeletricidade.

**Palavras-Chave:** Indústria de Celulose, Bioeletricidade, DEA, Externalidades.

## ABSTRACT

This research deals with discussions about the pulp industry and the importance of the electric sector for the economic, social and environmental development of a country. The generation of bioelectricity is a significant factor for sustainable development. Thus, the use of biomass bioelectricity of forest residues and black liquor, a new business player in the pulp industry, can help in the sustainable development of the region where they are inserted. The potential for generating energy from renewable sources in the coming years is very promising, and this study is associated with the growing demand of the world pulp market. The pulp industry's new production plants are considered biorefineries, since they use biomass and forest byproducts to generate energy. The bioelectricity generated in the production of cellulose is an alternative for renewable energy and can influence many aspects of society, the environment and the economy of the country. Externalities are impacts imposed on society that are not accounted for by producers or consumers. They can be classified as positive or negative, depending on how private action will influence social welfare, the economy or the environment. The objective of this thesis was to evaluate the efficiency of the pulp industries in the production of bioelectricity registered in ANEEL as a sustainable energy alternative and to identify the externalities that can indirectly influence this efficiency. The methodology used in this research was calculated by the Envelope Analysis Data Envelopment Analysis (DEA), to create indexes and rankings of bioelectricity production efficiency of Independent Energy Producers (PIE) and Self Energy Producers (APE) with installed capacity above 100,000.00 Watts. The Discrimination of the decision-making units (DMUs) was calculated using the composite index which consists of obtaining the weighted average and normalized average, by means of the maximum value of the standard and inverted efficiencies. Finally, for the post-efficiency analysis, truncated linear regression was used to identify the externalities that indirectly influence the behavior of this efficiency. In this way, the post-efficiency analysis approximates the indicators of the empirical reality of the industries, since they do not fully control all the factors that interfere at the production levels. In analyzing local data and information, it is evident that the pulp and forest industries brought benefits to the population, such as employment, increased incomes, increased cash flow in local commerce, real estate expansion, and increased real estate value. However, the impact of industrialization on the environment and the public sector that serves the population that generates these local impacts stands out. It is up to the planning to reduce the problems of infrastructure and minimize environmental impacts. The use of DEA combined with the composite index and truncated linear regression techniques provided satisfactory results that are important for public policy suggestions that may contribute to the development and incentive of bioelectricity production.

**Keywords:** Cellulose Industry, Bioelectricity, DEA, Externalities.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa. ....	20
Figura 2 - Desenvolvimento Sustentável: Consumo de Energia e os Impactos Ambientais....	22
Figura 3 - Representação das Áreas Plantadas do Brasil por Estado e Gênero em 2015.....	33
Figura 4- Fluxograma de Produção de Celulose e Bioeletricidade. ....	45
Figura 5- Produção de Bioeletricidade. ....	50
Figura 6 - Correção de Externalidades Negativas por Taxas Pigouvianas.....	53
Figura 7 - Evolução Histórica dos Trabalhos que Marcaram a Evolução do Modelo DEA. ...	68
Figura 8 - Fronteira de Produção, Eficiência Técnica, Economia de Escala e Produtividade. 70	
Figura 9 - Unidade de Tomada de Decisão. ....	72
Figura 10- Fronteira de Eficiência DEA BCC Clássica e Fronteira de Eficiência Invertida. ..	77



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Principais Fontes de Energia do Brasil. ....	28
Gráfico 2 - Maiores Produtores Mundiais de Celulose. ....	36
Gráfico 3 - Volume da Silvicultura, por Espécie Florestal 2014.....	36
Gráfico 4 - Índice de Produtividade em Metros Cúbicos por Hectare Ano de Eucalipto e Pinus. ....	37
Gráfico 5 - Principais Destinos da Celulose Produzida no Brasil 2015-2016.....	42
Gráfico 6 - Principais Países Produtores de Celulose no Mundo em 2016. ....	42
Gráfico 7 - Principais Países Consumidores de Celulose do Mundo. ....	43
Gráfico 8 - As Maiores Empresas Mundiais Produtoras de Celulose de Mercado. ....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção Total Líquida Mundial de Eletricidade por Região e País (2011-2040).	25
Tabela 2- Produção Líquida Mundial de Eletricidade por Combustível, 2012-40 (trilhões KWh).	26
Tabela 3 - Não-OECD Consumo de Energia por Região, 1990-2040 (quadrillion BTU).	26
Tabela 4 - Geração Elétrica por Fonte no Brasil Gwh.	27
Tabela 5 - Usinas Termoelétricas por Fonte.	29
Tabela 6 - Equações dos Modelos do DEA- CCR. Desenvolvido por Charnes et al. (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984).	74
Tabela 7 - Equações dos Modelos do DEA- BCC. Desenvolvido por Charnes et al. (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984).	75
Tabela 8: Unidades de Tomada de Decisão (DMUs).	80
Tabela 9: Escores de Eficiência d.o Modelo 1.	87
Tabela- 10: Escores de Eficiência do Modelo 2.	88
Tabela 11- Escores de Eficiência do Modelo 3.	90
Tabela 12: Score de Eficiência do Índice Composto do Modelo BCC-Output.	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APE	Autoprodutor de Energia Elétrica
PIE	Autoprodutor Independente de Energia Elétrica
BCC	Banker, Charnes e Cooper
BIG	Banco de Informações sobre Geração
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CEG	Código Único de Empreendimentos de Geração
CERFLOR	Sistema Brasileiro de Certificação Florestal
COI	Custos das Operações Industriais
COP21	Conferência das Partes
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DEED	Distância ambiental Econômica Direcional
DMU	<i>Decision Making Units</i>
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FSC®	Forest Stewardship Council®
GTAP	<i>Global Trade Analysis Project</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice Composto
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INDC	<i>Intended Nationally Determined Contribution</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IMA	Incremento Médio Anual
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INDC	<i>Intended Nationally Determined</i>
ISE	Índice de Sustentabilidade Empresarial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MME	Ministério de Minas e Energia

MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OCDE	Organização de Cooperação e Desenvolvimento
OI	Orientação ao <i>Input</i>
ONGs	Organizações não governamentais
OO	Orientação ao <i>Output</i>
PEFC	<i>Programmer for the Endorsement of Forest Certification Schemes</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PIE	Produtores Independente de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PPL	Problema de Programação Linear
SBM	<i>Slacks-Based Measure</i>
SECEX	Secretaria do Comércio Exterior
SFPBF	Setor de Fabricação de Produtos de Base Florest
WEO	<i>World Energy Outlook</i>
TIMOS	<i>Timber Investment Management Organizations</i>
UHE	Usinas Hidroelétricas
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>
WEO	<i>World Energy Outlook</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação .....	17
1.2	Objetivo Geral.....	18
1.3	Objetivos Específicos.....	18
1.4	Estrutura da Tese .....	18
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	Setor de Energia e o Desenvolvimento Sustentável.....	21
2.1.1	Setor de energia no mundo .....	25
2.1.2	Setor de energia no Brasil.....	27
2.1.3	Eficiência energética.....	30
2.2	Base Florestal .....	32
2.3	Indústria de Celulose.....	40
2.3.1	A indústria de celulose no Brasil.....	41
2.3.2	Processos produtivos .....	44
2.4	Externalidades .....	51
2.4.1	Externalidades positivas e negativas e seus impactos .....	55
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>57</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA E APLICAÇÕES.....</b>	<b>67</b>
4.1	DEA - <i>Data Envelopment Analysis</i> .....	67
4.2	Índice Composto .....	76
4.3	Etapas para aplicação do Método DEA.....	78
4.3.1	Levantamento Inicial .....	78
4.3.2	<i>Decision Making Units</i> (DMU) .....	79
4.3.3	Análise e Seleção de Variáveis.....	80
4.3.4	Definição do Modelo DEA.....	84
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>86</b>
5.1	Modelo 1: Produção de Celulose .....	86
5.2	Modelo 2: Produção de Bioeletricidade.....	88
5.3	Modelo 3: Produção de Celulose e Bioeletricidade.....	89
5.4	Modelo Pós-Eficiência .....	92
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>99</b>
6.1	Considerações Finais .....	99
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	101
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>124</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a economia mundial vem enfrentando diversos desafios relacionados ao meio ambiente. Dentre eles, destacam-se a atenuação das mudanças climáticas posta em evidência na 21ª Conferência das Partes (COP21, 2015) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC) em Paris, 2015. A partir das discussões e propostas desse evento, 195 países formalizaram um compromisso em limitar o aquecimento global abaixo de 2 graus Celsius, para reduzir os potenciais riscos e danos ambientais.

Assim, o pressuposto que os recursos naturais eram infinitos (TACHIZAWA, 2011) foram hipóteses simplistas que ignoravam os problemas causados pela industrialização, tais como: a emissão de gases poluentes na atmosfera, que contribui para o aumento da temperatura e para a disseminação de doenças, a redução dos recursos naturais e a disposição final inadequada dos resíduos provenientes do processo de industrialização (sólido, líquido e gasoso).

Para Macedo e Ribeiro (2010), o crescimento da produção interna dos países deve-se muito ao setor de infraestrutura, que possui impacto significativo sobre a produtividade geral da economia, o crescimento econômico e o bem-estar da população. Assim, as discussões sobre o setor industrial, as fontes de energias renováveis e sua importância para o desenvolvimento e crescimento econômico, social e ambiental de um país são fundamentais para o desenvolvimento sustentável.

Os aspectos demográficos apresentados por Piketty (2014) e as estimativas da Organização de Cooperação e Desenvolvimento (OCDE) Nações Unidas em 2014 apontam que a população deve ter um crescimento em torno de 1% ao ano, devendo estar, até 2050, próximo de 9,5 bilhões de habitantes. Para retratar o aumento do consumo de massas, o setor industrial é o mais dinâmico, com maior consumo de insumos, tanto energéticos quanto naturais.

Dessa forma, a crescente demanda de energia elétrica, as projeções de crescimento da população, a introdução de novas tecnologias, as discussões sobre o setor energético e a introdução de bioeletricidade são postas em evidência nesta pesquisa. Uma vez que o mundo enfrenta atualmente uma dupla ameaça no setor da energia, provocada pela inexistência de uma oferta segura e adequada de energia a preços acessíveis e pelos danos impostos ao ambiente pelo excessivo consumo energético (MICHOPoulos, 2014).

Estudos como McKendry (2002) e Sgroi et al. (2015) apresentaram fontes de energia renováveis, tais como: energia hidráulica, biomassa, geotérmica, eólica e solar, como uma alternativa viável aos combustíveis fósseis tradicionais. Os benefícios estabelecidos pela utilização dessas fontes renováveis não estão sujeitos a exaustão dos recursos ambientais. Neste sentido, a bioeletricidade gerada na produção de celulose é uma opção de energia renovável e pode influenciar os aspectos sociais, econômicos e ambientais da sociedade.

O Brasil se destaca na produção mundial de celulose, ocupando a terceira posição no *ranking* dos países produtores de celulose de todos os tipos, sendo o primeiro colocado como exportador de celulose de eucalipto (FAO, 2014), com grande potencial de crescimento. Por meio de dados obtidos pela Secretaria do Comércio Exterior (SECEX) e Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2017, a produção de celulose em 2015, comparada com 2014, teve um crescimento de 8%, atingindo um volume de 11.970 milhões de toneladas de celulose. No ano de 2016, sua produção foi de 12.901 milhões de toneladas. Esses números são expressivos ao compará-los com a produção dos mercados tradicionais da indústria de celulose, em países como Estados Unidos, Canadá e China (SECEX, 2017 e IBÁ, 2017).

Dados preliminares apresentados por Rossato et.al. (2016) demonstram um potencial significativo para a geração de bioeletricidade na indústria de celulose, que pode ser explorada do ponto de vista das externalidades positivas em vários setores econômicos, sociais e ambientais, por exemplo, pelos produtores de florestas de eucalipto e pinus, pelos fornecedores de máquinas e equipamentos para a indústria, os insumos, os benefícios para as comunidades, o desenvolvimento local, a participação na matriz energética. No entanto, as externalidades negativas também podem ser destaque na atividade industrial. Marcovitch (2006) afirma que a indústria de celulose pode ser considerada a principal entidade responsável pela emissão de gases de efeito estufa, emissões de águas residuais e resíduos sólidos que podem comprometer a qualidade do ar, da água e do solo.

De acordo com Mankiw (2006), uma externalidade surge quando a ação de uma pessoa provoca impacto no bem-estar de um terceiro que não participa dessa ação, sem pagar nem receber nenhuma compensação por esse impacto, ou seja, "é uma imposição de um efeito externo causado a terceiros, gerada em uma relação de produção, consumo ou troca" (LONGO, 1993). Mochón (2002) afirma que essas externalidades aparecem quando efeitos colaterais inesperados são causados pela produção ou consumo nos preços de mercado. Williamson (1996) destaca que na literatura econômica é comum atribuir uma externalidade para derivar as carências de um mercado em comparação com um tipo ideal.

As externalidades podem ser classificadas como positivas ou negativas, dependendo de como a ação privada influenciará o bem-estar social, a economia ou o ambiente.

No entanto, as indústrias têm centrado mais atenção aos vários aspectos do equilíbrio ecológico, que tem sido acompanhado por ações de empresas e governos. As externalidades positivas representam uma poupança nos custos de produção e nos benefícios para os agentes que delas gozam, enquanto as externalidades negativas estão associadas às perdas e aos aumentos de desvantagens de custo. As empresas devem identificar oportunidades econômicas a partir da reciclagem, reutilização e reprocessamento de subprodutos (LEITE, 2009).

A produção de energia a partir de fontes renováveis depende do desenvolvimento tecnológico, uma vez que a tecnologia é essencial por exemplo, para a conversão da energia solar em energia elétrica. O desenvolvimento tecnológico para a produção de bioeletricidade nas indústrias de celulose é intensivo em capital, mas o produto final esperado é a celulose. A produção e comercialização de bioeletricidade é um novo *player* de negócio com vantagens significativas para a indústria e seus parceiros. Para a indústria de celulose, a eficiência energética na produção de bioeletricidade é fundamental para compor um cenário sustentável, que pode absorver as externalidades e minimizar o impacto com a produção de uma fonte renovável de energia.

O desempenho dos setores energético, florestal e da indústria de celulose são importantes para o bem-estar de toda a economia e tem atraído a atenção de muitos pesquisadores. Atualmente, a maioria dos estudos se concentram nas economias desenvolvidas, como estudados por diversos autores, dentre eles Macedo (2009), Bajay (2010), Dasappa (2011), Dandres (2012), Fischer e Zylbersztajn (2012), Montebello e Bacha (2013), Ojala et al. (2013), Jannuzzi (2013), Bajpai (2013), Sgroi (2015), Barbeli (2015) e Rossato *et al.* (2016). A disponibilidade e as perspectivas para a produção da bioeletricidade a partir de biomassa de celulose e licor negro, somadas às suas vantagens competitivas ambientais e ao crédito de carbono, sugerem que as indústrias de celulose no Brasil possuem vantagem competitiva no desenvolvimento sustentável para a produção de energia.

Nesse sentido, o aproveitamento de resíduos, como o licor negro, podem reduzir as externalidades negativas causadas pela indústria de celulose, devido ao seu potencial renovável e sustentável em substituição a produtos derivados atualmente de petróleo. Assim, contribui com a diminuição de emissão de gases poluentes, aumentando a eficiência energética dos processos atuais e ainda podendo vir a garantir segurança energética e de suprimentos químicos (BERNI et al., 2010; TANAKA, 2011, BARBELI, 2015).

O caminho para a sustentabilidade energética é comumente associado à adoção incremental de tecnologias disponíveis. As práticas e políticas podem ajudar a reduzir o impacto ambiental do setor da energia, proporcionando um padrão adequado de serviços energéticos. A identificação das externalidades e as práticas e políticas para mitigar os



impactos ambientais, sociais e econômicos estão relacionadas com o esgotamento dos recursos energéticos e requerem um conhecimento profundo dos efeitos locais para soluções propostas.

Para calcular os efeitos de um grande sistema complexo de áreas florestais e urbanas, é necessária uma abordagem avançada multidisciplinar para superar as dificuldades na aplicação de modelos aos fenômenos reais. Além disso, uma metodologia que integra diferentes modelos e técnicas permite a investigação e sugestões de estratégias em áreas específicas.

A objetivo desta pesquisa é contribuir com a discussão sobre importância da geração de bioeletricidade a partir da produção de celulose. Este estudo propõe o uso do método de *Data Envelopment Analysis* (DEA) para avaliar a eficiência das indústrias de celulose dos Produtores Independentes de Energia (PIE) e dos Autoprodutores de Energia (APE) que geram bioeletricidade, assim como identificar as externalidades que influenciam o desempenho dessa eficiência. Justifica-se a escolha desse método devido à escassez de estudos a respeito da bioeletricidade geradas na produção de celulose, viabilizados por meio do modelo DEA. Realizou-se uma pesquisa nas bases de dados *Scopus* com as palavras chaves “DEA”, “*pulp*” e “*bioelectricity*” e não foram encontradas pesquisas com esses conteúdos.

Portanto, esta pesquisa pode contribuir de maneira original, devido à aplicação do DEA para avaliar a eficiência das indústrias de celulose em gerar bioeletricidade. Do ponto de vista científico, o uso do modelo DEA é aplicado para a construção de indicadores, para sistematizar e aprofundar pesquisas nesse campo pouco explorado da bioeletricidade, como uma alternativa energética sustentável na indústria de celulose. Para a esfera de políticas públicas e gestão empresarial, este estudo pode proporcionar informações e análises capazes de auxiliar o processo de tomada de decisão.

Nesse contexto, a revisão da literatura e a seleção de trabalhos foram fundamentais para responder as questões desta pesquisa: Como identificar a eficiência das indústrias de celulose que geram bioeletricidade classificadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Brasil? Quais são as externalidades positivas e negativas encontradas? Qual a contribuição da bioeletricidade para indústrias de celulose e para sociedade?

## 1.1 Motivação

A motivação para essa pesquisa é a importância da indústria de celulose no cenário econômico, que atualmente vem passando por grandes transformações estruturais devido às mudanças globais na demanda de celulose, na oferta de energia e nas discussões sobre o

aquecimento global. Essas mudanças têm impactos significativos nas economias nacionais em todo o mundo.

Nesta pesquisa, os objetivos específicos estão estreitamente relacionados. Por exemplo, a partir do eucalipto e pinus é produzida a celulose, que é o produto final. A biomassa residual e o licor negro são usados para gerar bioeletricidade. No entanto, existem várias características, como a área para o cultivo de florestas, as condições climáticas favoráveis, a utilização da água como fonte de energia, a produtividade e os fatores de produção, que devem ser avaliados em conjunto.

Esta pesquisa abrange algumas questões atuais relevantes, como a eficiência dos sistemas de produção, a crise da água, os altos preços da energia e a tendência para usar fontes de energia renováveis, por conseguinte, a conjuntura dos atuais interesses públicos mundiais. Essa tese destina-se a beneficiar a indústria, a sociedade e o setor público.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta tese foi avaliar a eficiência das indústrias de celulose na produção de bioeletricidade registradas na ANEEL como alternativa energética sustentável e identificar as externalidades que podem influenciar indiretamente nessa eficiência.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- a) Identificar as variáveis que mais impactam na dinâmica de produção da celulose e bioeletricidade;
- b) Obter os *rankings* de eficiência das indústrias de celuloses na produção de bioeletricidade;
- c) Identificar como as externalidades influenciam a eficiência das indústrias de celulose produtoras de bioeletricidade.

## **1.4 Estrutura da Tese**

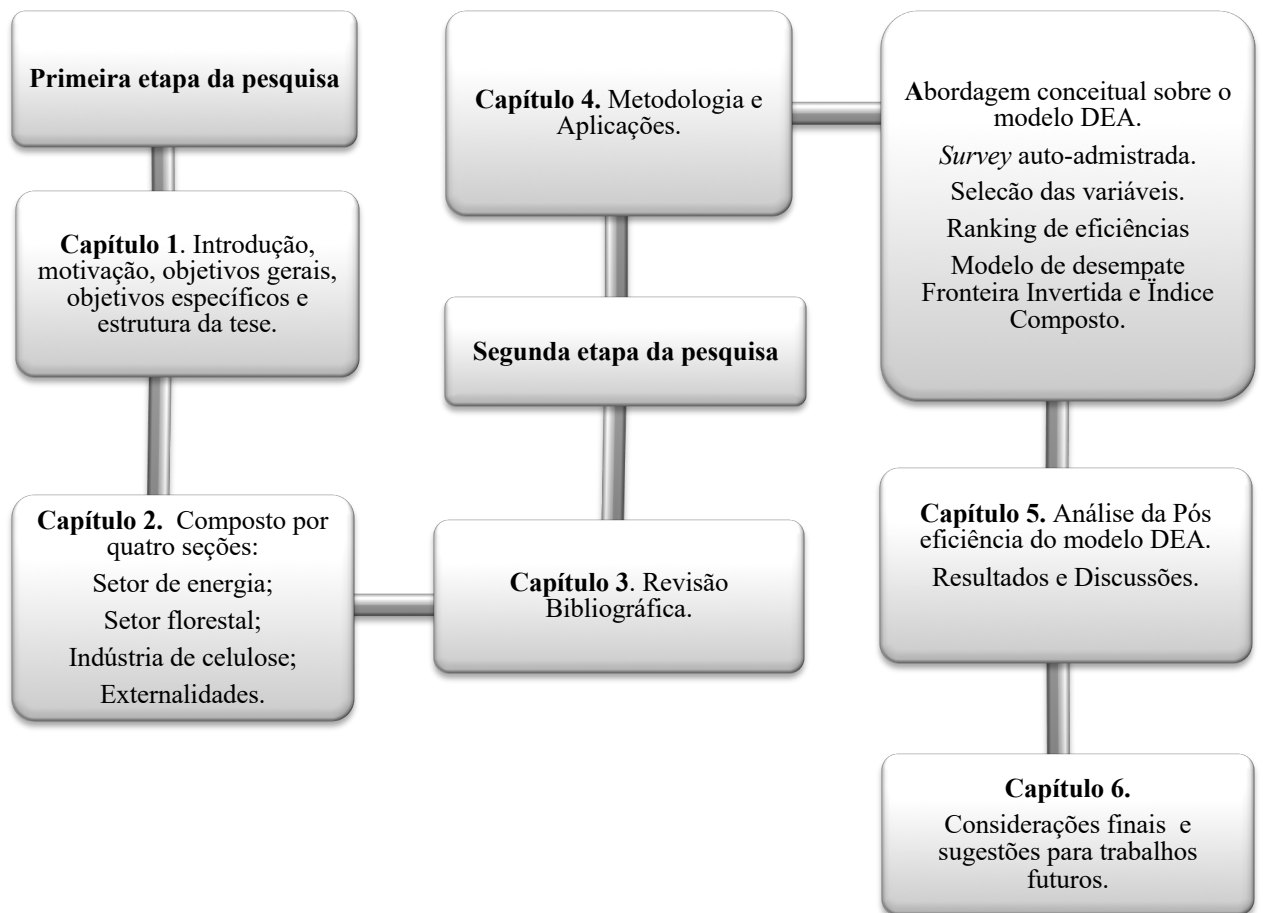
A presente tese está estruturada em duas etapas distintas e dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, motivação, objetivos gerais, objetivos específicos e estrutura da tese. O segundo capítulo estabelece as bases teóricas compostas por

quatro seções. A primeira seção, “Setor de Energia”, contém uma visão geral do setor energético e a relação com a utilização de fontes renováveis e a sustentabilidade no Brasil e no mundo, bem como apresenta a relevância da eficiência energética para as indústrias. A segunda seção: “Base Florestal” retrata o potencial das florestas de eucalipto e pinus, importância das florestas para o cenário econômico, social e ambiental. A terceira seção, “A Indústria de Celulose”, apresenta as indústrias de celulose no Brasil e, define a estrutura e características das indústrias, os métodos de processamento da celulose, e descrição do método moderno para gerar bioeletricidade. A última seção, “As Externalidades”, apresenta os conceitos de externalidade, as diferenças entre externalidades positivas e externalidades negativas e faz um breve histórico das metodologias utilizadas para avaliá-las.

O terceiro capítulo consiste na revisão bibliográfica e no levantamento do estado da arte. Tem como foco o estado atual das pesquisas, com apresentação de modelos que estabelecem a diferenciação básica entre os modelos “*bottom-up*” e “*top-down*”. A partir dessa análise foram selecionados trabalhos sobre a adequação das ferramentas de modelagem existentes que serviram de subsídios para identificar a eficiência das indústrias de celulose. Finalmente, foi definido como identificar as externalidades das indústrias estudadas.

Na segunda etapa que se inicia com o capítulo 4, são apresentadas as ferramentas metodológicas. O objetivo foi apresentar uma abordagem conceitual sobre o modelo DEA, identificar as variáveis para produção de bioeletricidade nas indústrias de celulose, subsidiadas pela *survey* auto-administrada; selecionar as variáveis e obter o *ranking* de eficiências das indústrias de celulose para a produção de bioeletricidade. Nessa etapa foi introduzido o modelo de desempate fronteira invertida e o de índice composto. No capítulo 5, para avaliar a influência das externalidades e como elas impactaram na eficiência na produção de bioeletricidade, foi realizada a análise de pós eficiência através do método de regressão linear truncada. A análise de pós eficiência é conhecida como avaliação do segundo estágio do modelo DEA, são apresentados os resultados e discussões. Finalmente no capítulo 6, foram feitas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. O Fluxograma abaixo apresenta um resumo das etapas da tese.

Figura 1 - Fluxograma das Etapas da Pesquisa.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é composto por quatro seções que apontam as relações entre os setores energético, florestal, e da indústria de celulose bem como as definições das externalidades positivas e negativas. Foi realizado um levantamento de material bibliográfico, imagens, dados estatísticos nacionais e internacionais, tais como: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Indústria Brasileira de Árvores (IBA), e de entidades representativas do setor Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA) e Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF).

### 2.1 Setor de Energia e o Desenvolvimento Sustentável

As discussões em torno do aquecimento global e consequências dos riscos e incertezas no cenário ambiental atual e das futuras gerações têm pressionado de maneira significativa a produção e utilização de energias de fontes renováveis. Nos primeiros estudos da economia como ciência, o setor energético já encontrava relação com as questões ambientais, mas o problema era pouco discutido, por exemplo, o destino dos resíduos ou o efeito dos poluentes no meio ambiente.

O início da política ambiental moderna permeia os anos sessenta e meados dos setenta, e se concentrou principalmente nos poluentes do ar, na qualidade da água e na eliminação de resíduos sólidos. Ao mesmo tempo, na década de setenta, foi estabelecido o trabalho teórico mais importante na área da economia ambiental neoclássica, que ainda é usado até hoje para uma compreensão teórica dos instrumentos de política ambiental (ROGALL, 2008, p. 27 *apud* FAIS, 2015).

A ideia básica da economia ambiental consiste em integrar o meio ambiente, representado por *commodities* ambientais no sistema econômico. Assim como as *commodities* regulares, as ambientais afetam o bem-estar da sociedade. Elas são percebidas como escassas e, portanto, devem ser consideradas no problema de alocação de recursos econômicos.

As questões centrais dos estudos econômicos permearam os limites do crescimento econômico em função do esgotamento de recursos naturais, ou seja, é importante determinar a maneira mais eficiente de alocar os recursos escassos aos vários processos de produção bem como os bens produzidos aos consumidores. Segundo Goldemberg (1998), os seres humanos necessitam de serviços energéticos como transporte, aquecimento, refrigeração, que podem ser supridos com base nas fontes de energia com maior ou menor eficiência e que estão ligados

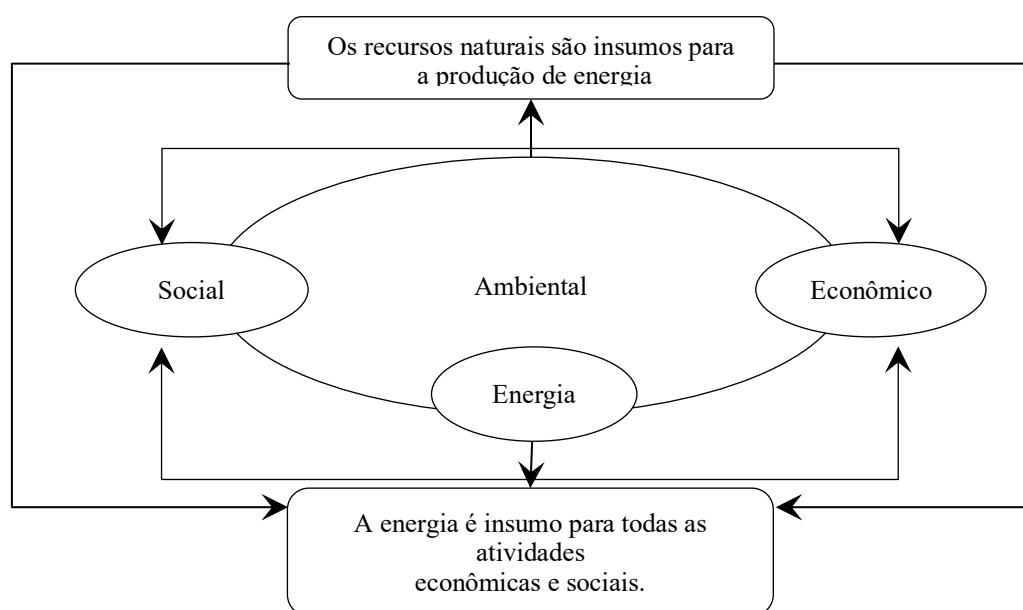
diretamente ao desenvolvimento humano. Um dos desafios da sustentabilidade ambiental urbana é a conscientização de que esse é um processo a ser percorrido e não algo definitivo a ser alcançado.

À medida que as economias se industrializam, crescem e se tornam dependentes de infraestruturas e sistemas tecnológicos mais sofisticados, a energia torna-se cada vez mais importante para indivíduos, empresas e nações. No entanto, o mundo enfrenta uma série de problemas relacionados com a energia e restrições que potencialmente ameaçam a industrialização contínua e o crescimento econômico.

O desenvolvimento de energia sustentável pode ser analisado de três maneiras distintas. Primeiro, do ponto de vista social, por meio do qual as pessoas podem ter acesso a serviços básicos de energia a preços aceitáveis. Segundo, sob a esfera econômica, na qual quanto maiores o desenvolvimento e o crescimento econômico, maior é a demanda por energia, uma vez que esta é a entrada de produtividade usada por todos os segmentos econômicos. Além disso, o consumo energético também pode ser utilizado como indicador de nível de pobreza de uma população.

Finalmente, do ponto de vista ambiental, o esgotamento dos recursos naturais através da produção e distribuição de energia gera impactos que criam pressão sobre o meio ambiente (KEMMLER e SPRENG, 2007). A Figura 2 apresenta a relação entre desenvolvimento socioeconômico, consumo de energia e os impactos ambientais subsequentes.

Figura 2 - Desenvolvimento Sustentável: Consumo de Energia e os Impactos Ambientais.



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Os recursos naturais podem gerar energia, que impulsiona a economia e basicamente todas as atividades humanas. Ao procurar a disponibilidade de energia em um país ou região, é importante considerar o equilíbrio do desenvolvimento sustentável, incluindo restrições nas seguintes áreas: ambiental, econômica e social. Alcançar uma qualidade ambiental sustentável é um desafio para os países que buscam o crescimento econômico sem levar em consideração o desenvolvimento local. Portanto, o desafio é alcançar o progresso econômico, modificando as ações do mercado e suas atividades, visando à preservação dos recursos naturais e do meio ambiente.

Nogueira *et al.* (2000) analisou as limitações ambientais e constatou que elas estão associadas à preservação do meio ambiente e à qualidade de vida, podendo interferir na produção de florestas plantadas e na diminuição da biodiversidade. As limitações econômicas são analisadas em níveis separados; em primeiro lugar é necessário saber se a biomassa explorada não tem um uso mais econômico (indústria e alimento) e, em segundo lugar, se todos os custos da biomassa explorada são compatíveis com os benefícios energéticos e comparáveis com os demais combustíveis.

Na COP 21 (2015) vários países concordaram em limitar o aquecimento global abaixo de 2 graus Celsius. A maioria dos países comprometeu-se a intensificar as energias renováveis e a eficiência energética por meio de suas contribuições pretendidas em âmbito nacional, *Intended Nationally Determined Contribution (INDC)*. Dos 189 países que apresentaram INDCs, 147 países referiram-se à energia renovável e 167 nações mencionaram a eficiência energética. Além disso, alguns países se comprometeram a repensar seus subsídios para combustíveis fósseis. Os governos regionais, estaduais e locais, bem como o setor privado assumiram compromissos de fixação de prioridades para energias renováveis (ADIB et al 2015).

Uma vez que a relação do homem com a exploração dos recursos primários encontra-se cada vez mais acentuada, faz-se necessário um incremento do uso de fontes energéticas renováveis. É fato que essa relação no ambiente resultaria em sua degradação, haja vista o pressuposto de que os recursos naturais seriam infindáveis (TADEU, 2011). Assim, existe a possibilidade de reduzir a dependência de fontes fósseis de energia, de reduzir emissão de gases de efeito estufa, de promover a eficiência energética da indústria e de contribuir positivamente com o desenvolvimento sustentável.

Alguns dos processos industriais como nas plantas químicas de papel e celulose, nas usinas de açúcar e álcool, nas indústrias alimentícias e várias outras indústrias que demandam energia térmica em forma de vapor e energia elétrica, são prejudicados pelos

crescentes custos dos insumos energéticos, dos combustíveis utilizados na geração de vapor e de energia elétrica. Assim essas indústrias devem permanentemente buscar a forma mais econômica de utilização de energia (PEREIRA JUNIOR, 2001).

Tolmasquim (2011) destaca que a capacidade de um país em prover logística e energia para o desenvolvimento de sua produção, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis, é um dos fundamentos para sua sustentabilidade econômica.

No entanto, Goldemberg (1998) aponta que a barreira de ordem econômica é a mais significativa, uma vez que, os investimentos em tecnologias são considerados de altos custos. Neste sentido, o maior desafio é obter avanço econômico, porém modificando a atividade do mercado de modo que os recursos naturais e o meio ambiente sejam preservados. Outro desafio é que a energia elétrica enquanto insumo, não é diretamente estocável em grandes quantidades, implicando na necessidade de que sua geração e consumo se deem simultaneamente de forma a haver um equilíbrio instantâneo (PINTO et al., 2007).

Para Dias (2011) as empresas são as principais responsáveis pelo esgotamento e pela degradação e escassez de recursos naturais, pois é da natureza que extraem a matéria-prima para o processo produtivo. Neste sentido, os problemas ambientais são atribuídos principalmente às nações desenvolvidas e às práticas irregulares das nações em desenvolvimento.

O desenvolvimento sustentável é um desafio a ser estudado, pois, conseguir equilíbrio do desenvolvimento sustentável: ambiente, sociedade, economia e energia é muito complexo. Para isso é necessário o envolvimento de várias escalas de partes interessadas, desde instituições locais até governos nacionais internacionais, bancos e agências de desenvolvimento, organizações internacionais e regionais, institutos de pesquisa e universidades, Organizações não Governamentais (ONGs), sociedade civil e setor privado (FAO, 2014).

Os índices de eficiência das indústrias de celulose que geram bioeletricidade e a identificação das externalidades podem subsidiar os agentes reguladores na busca pelo equilíbrio no desenvolvimento sustentável, impondo limites, regulamentações e pagamento de taxas em casos de externalidades negativas ou incentivos quando identificadas as externalidades positivas. Incentivar a geração de energia a partir de fontes de energia renováveis e a cogeração de bioeletricidade contribui para redução das externalidades negativas por ser uma maneira econômica de reduzir as dependências de eletricidade oriundas de fontes hídricas, reduzindo, assim, os custos para todos os pagadores de tarifas.



### 2.1.1 Setor de energia no mundo

Segundo os dados apresentados pelo *Energy Information Administration* (EIA, 2016), as perspectivas para geração de energia no mundo continuam mostrando níveis crescentes de oferta nas próximas três décadas, lideradas por fortes aumentos desta oferta em que países que não fazem parte da Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). A Tabela 1 apresenta a produção líquida total em bilhões de quilowatts hora (Wkh) de eletricidade dos principais países no mundo de 2011 até as projeções de 2040 (EIA, 2016).

Tabela 1 - Produção Total Líquida Mundial de Eletricidade por Região e País (2011-2040).

Histórico	Projeções							Δ% média anual. 2012-2040
	2011	2012	2020	2025	2030	2035	2040	
OECD								
OECD								
OECD Américas	5.071	5.017	5.449	5.724	6.036	6.359	6.727	1,10%
Estados Unidos da América	4.102	4.055	4.351	4.513	4.691	4.86	5.056	0,80%
Canadá	627	616	692	748	809	880	958	1,60%
México/Chile	342	346	406	463	535	618	713	2,60%
OECD Europa	3.455	3.483	3.858	4.09	4.328	4.59	4.889	1,20%
OECD Ásia	1.808	1.748	2.014	2.142	2.261	2.398	2.536	1,30%
Japão	1.033	968	1.058	1.097	1.124	1.149	1.149	0,60%
Coreia do Sul	491	501	628	680	735	794	856	1,90%
Austrália/Nova Zelândia	284	279	328	364	402	455	530	2,30%
Total OECD	10.334	10.248	11.321	11.956	12.625	13.347	14.152	1,25%
Não-OECD								
Não-OECD Europa e Eurásia	1.636	1.65	1.688	1.823	1.951	2.081	2.147	0,90%
Rússia	998	1.013	1.033	1.095	1.151	1.206	1.205	0,60%
Outros	638	637	655	728	800	875	943	1,40%
Não-OECD Ásia	6.689	7.02	9.618	10.978	12.197	13.521	14.909	2,70%
China	4.547	4.771	6.685	7.497	8.145	8.794	9.426	2,50%
Índias	1.006	1.052	1.387	1.669	1.966	2.336	2.769	3,50%
Outros	1.135	1.196	1.546	1.811	2.086	2.391	2.714	3,00%
Oriente Médio	797	848	1.079	1.261	1.448	1.66	1.882	2,90%
África	659	682	827	970	1.129	1.328	1.55	3,00%
Non-OECD Américas	1.087	1.111	1.232	1.366	1.491	1.644	1.814	1,80%
Brasil	530	538	615	694	770	863	966	2,10%
Outros	557	574	617	672	721	781	848	1,40%
Total Não-OECD	10.867	11.312	14.444	16.399	18.215	20.234	22.302	2,50%
Total Mundo	21.201	21.559	25.765	28.354	30.84	33.581	36.454	1,90%

Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) 2016.

A geração líquida mundial de eletricidade aumentará 69% até 2040, passando de 21,6 trilhões de kWh em 2012 para 25,8 trilhões de kWh em 2020 e 36,5 trilhões de kWh em

2040. A geração líquida é a quantidade de geração de eletricidade bruta que um gerador produz menos a eletricidade usada para operar a usina.

A Tabela 2 apresenta a produção líquida por fonte de energia (EIA, 2016). A participação do Petróleo na geração total cai de 40% em 2012 para 29% em 2040 e a de carvão aumenta em 25% até 2040. A geração total para fontes de energia renováveis de gás natural se expande de 22% em 2012 para 29% em 2040 e para as demais energias renováveis de 22% em 2012 para 28% em 2040.

Tabela 2- Produção Líquida Mundial de Eletricidade por Combustível, 2012-40 (trilhões KWh).

	2012	2020	2025	2030	2035	2040
Petróleo	1.06	0.86	0.69	0.62	0.59	0.56
Nuclear	2.34	3.05	3.40	3.95	4.25	4.50
Gás Natural	4.83	5.26	6.30	7.47	8.78	10.14
Carvão	8.60	9.73	10.07	10.12	10.31	10.62
Renováveis	4.73	6.87	7.89	8.68	9.64	10.63

Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) 2016.

Segundo os dados do EIA (2016), a participação mundial de combustíveis primários utilizados para gerar eletricidade mudou muito nas últimas décadas, mas o carvão continua a ser o combustível mais utilizado na geração de eletricidade. Contudo, projeções de mudanças são significativas em outros combustíveis, como o gás natural, e uma maior participação de fontes renováveis. As preocupações com a segurança energética, os efeitos das emissões de combustíveis fósseis no meio ambiente e os altos preços sustentados do petróleo a longo prazo apoiam o uso expandido de fontes renováveis.

A Tabela 3 mostra o consumo mundial de eletricidade por região de 1990 a 2040. Parte do aumento mundial da demanda de energia ocorre entre os países em desenvolvimento que não pertencem à OCDE, onde o forte crescimento econômico e as populações em expansão lideram o aumento do consumo mundial de energia. A procura de energia não-OCDE aumentará em 71% de 2012 para 2040. Em contraste, nas economias mais maduras e com crescimento lento da OCDE, o consumo total de energia aumenta apenas 18% entre 2012 e 2040.

Tabela 3 - Não-OECD Consumo de Energia por Região, 1990-2040 (quadrillion BTU).

	Histórico		Projeções			
	1990	2000	2012	2020	2030	2040
Ásia	50.22	77.99	175.93	222.71	269.85	322.07
Oriente médio	10.75	16.28	31.69	40.81	50.74	61.84
África	10.69	13.96	21.51	26.14	33.77	43.96
Américas	16.20	21.89	31.02	33.49	39.74	47.34
Europa e Eurásia	67.07	43.47	50.69	51.85	56.40	57.62

Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA) 2016.

O crescimento econômico e populacional junto com as mudanças estruturais e padrões de consumo influenciam a demanda mundial de eletricidade. À medida que os países se desenvolvem, melhora o padrão de vida da população e, conseqüentemente, a demanda de energia cresce rapidamente. Por exemplo, o crescimento econômico acelerado de uma população exige mais energia para crescente capacidade de produção e consumo de bens e serviços. Portanto, as políticas de incentivos são fundamentais para o crescimento e promoção de fontes de energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis.

### 2.1.2 Setor de energia no Brasil

O setor energético brasileiro foi constituído de acordo com as características ambientais do país, que sobressai pelos fatores naturais e geográficos com grande quantidade de paisagens e biomassa (CNI, 2010). De acordo com os dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2016) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016), a energia elétrica é constituída por uma matriz diversificada, mas predominantemente com 62,8% de hidroelétrica, seguida por uma grande expansão das fontes eólica, biomassa e gás natural. A oferta interna de eletricidade é apresentada na Tabela 4.

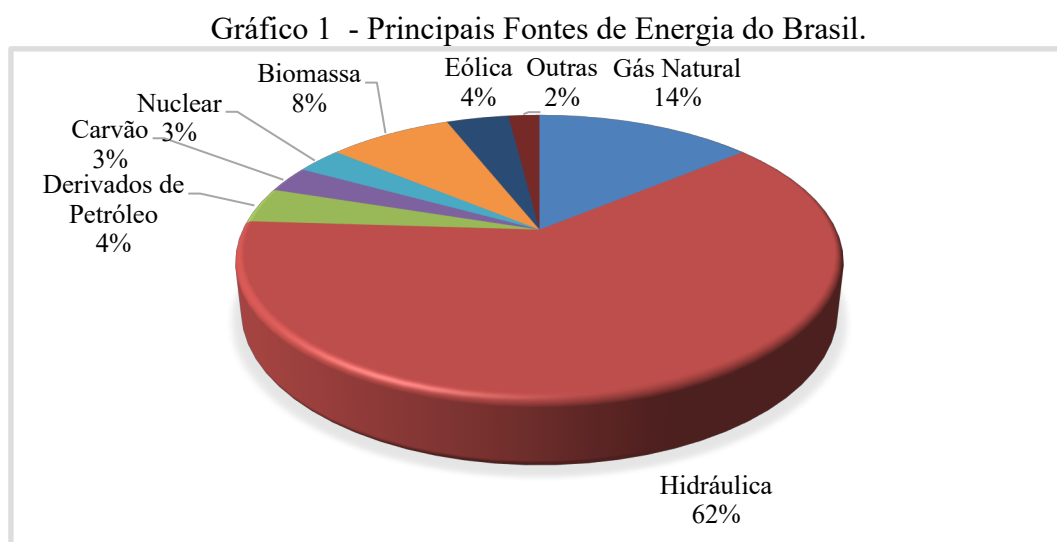
Tabela 4 - Geração Elétrica por Fonte no Brasil Gwh.

	2011	2012	2013	2014	2015	$\Delta\%$ (2015/2014)	Part. % (2015)
Total	531.758	552.498	570.835	590.542	581.486	-1,5%	100%
Gás Natural	25.095	46.760	69.003	81.073	79.490	-2,0%	13,7%
Hidráulica	428.333	415.342	390.992	373.439	359.743	-3,7%	61,9%
Derivados de Petróleo	12.239	16.214	22.090	31.529	25.662	-18,6%	4,4%
Carvão	6.485	8.422	14.801	18.385	19.096	3,9%	3,3%
Nuclear	15.659	16.038	15.450	15.378	14.734	-4,2%	2,5%
Biomassa	31.633	34.662	39.679	44.987	47.394	5,4%	8,2%
Eólica	2.705	5.050	6.578	12.210	21.626	77,1%	3,7%
Outras	9.609	10.010	12.241	13.590	13.741	1,1%	2,4%

**Fonte:** Balanço Energético Nacional 2016; Elaboração: EPE.

As flutuações sazonais e variáveis climáticas podem comprometer diretamente a quantidade de energia gerada. O *World Energy Outlook* (WEO) é o relatório anual publicado pela EIA (2016), deu destaque ao Brasil devido aos problemas climáticos que a região sudeste do país sofreu com uma seca de três anos consecutivos, considerada um dos piores eventos de escassez de água da região em 35 anos, com isso, a produção de hidroeletricidade caiu em 2012, resultando em períodos de apagão de energia e na busca por alternativas de fontes energéticas no país. Como a produção hidrelétrica caiu durante esse período, a geração de

outros combustíveis, como gás natural e combustíveis líquidos, aumentou. No Gráfico 1 mostra a distribuição das principais fontes de energia no Brasil.



**Fonte:** Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); Balanço Energético Nacional 2016.

O Brasil tem atualmente 201 Usinas Hidroelétricas (UHE) em operação, que totalizam mais de 84 gigawatts (GW). Com as usinas em construção e autorizadas, a capacidade de geração hidrelétrica do Brasil deverá aumentar para 112 GW até 2024 (EIA, 2016).

No Brasil, os desafios para utilização de fontes alternativas são proporcionais à extensão territorial. Uma dessas questões está pautada no aproveitamento energético dos recursos naturais existentes, distribuídos de forma heterogênea nas mais variadas regiões do país. Nesse sentido, pode-se afirmar que o Brasil tem capacidades promissoras para a geração energética com recursos renováveis em diversas regiões (REIS; FADIGAS e CARVALHO, 2012).

As Usinas Termoelétricas são apresentadas na Tabela 5, segundo a classificação de empreendimentos termelétricos de biomassa no Banco de Informações sobre Geração (BIG) da ANEEL. Os dados extraídos do relatório gerencial da ANEEL (2016) mostram uma participação de 34,37% de fontes renováveis em comparação às fontes de combustíveis fósseis, sendo a maioria, aproximadamente 85% por usinas de cana-de-açúcar e 15% por usinas de licor negro. No entanto, são 399 usinas de cana-de-açúcar e 17 usinas de licor negro. Portanto é evidente o potencial de geração de bioeletricidade das indústrias de celulose.

Tabela 5 - Usinas Termoelétricas por Fonte.

Tipo			Usinas Termoelétricass		
			Quantidade	Potência instalada (kW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaçõ de Cana-de açúcar	399	10.833.904	29,9%
		Biogás - AGR	3	1.822	0,01%
		Capim Elefante	3	65.700	0,18%
		Casca de Arroz	12	45.333	0,13%
	Biocombustíveis Líquidos	Etanol	1	320	0,00%
		Óleos Vegetais	2	4.350	0,01%
	Floresta	Carvão Vegetal	8	54.097	0,15%
		Gás de Alto Forno - Biomassa	11	322.265	0,89%
		Lenha	2	14.650	0,04%
		Licor Negro	17	2.262.136	6,24%
		Resíduos de Madeira	50	386.100	1,07%
	Resíduos animais	Biogás - RA	10	2.099	0,01%
Resíduos sólidos urbanos					
Fóssil	Carvão mineral	Biogás - RU	15	114.680	0,32%
		Calor de Processo - CM	1	24.400	0,17%
		Carvão Mineral	13	3.389.465	9,35%
	Gás natural	Gás de Alto Forno - CM	9	199.130	0,55%
		Calor de Processo - GN	1	40.000	0,11%
		Gás Natural	159	12.968.689	35,79%
	Outros Fósseis	Calor de Processo - OF	1	147.300	0,41%
		Petróleo	Gás de Refinaria	7	315.560
	Óleo Combustível		43	4.056.847	11,20%
	Óleo Diesel		2164	4.819,762	11,74%
	Outros Energéticos de Petróleo		18	980.328	2,39%
	Total			2.291	41.048.937

**Fonte:** Banco de Informações de Geração – BIG, ANEEL 2016.

A maioria dos empreendimentos está cadastrada no BIG como Produtores Independente de Energia (PIE<sup>1</sup>), o que significa que podem comercializar energia. No entanto, das 17 usinas de licor negro, apenas 10 são cadastradas no BIG como Autoprodutor de Energia Elétrica (APE<sup>2</sup>) e apenas 5 como PIE, o que indica que esse segmento tem como destino majoritário da sua bioeletricidade o autoconsumo, embora exista interesse no mercado livre quando os preços comercializados são atrativos.

De acordo com os dados da ANEEL (2016), as usinas termoelétricas têm aumentado sua participação gradativa na matriz nacional e auxiliando a base do fornecimento contínuo de energia elétrica. Outra informação evidente pelas projeções é que nas próximas décadas as hidroelétricas não vislumbram projeções de crescimento e têm o seu potencial quase completamente esgotado no Brasil. Com isso as térmicas aumentam sua participação nas fontes renováveis, tais como, eólica, solar e biomassa.

1 Produtor Independente de Energia Elétrica é a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização do poder concedente para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

2 APE - Autoprodutor de Energia Elétrica é a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

### 2.1.3 Eficiência energética

O consumo energético de um setor da economia pode ser determinado pelo seu nível de atividade (intensidade de produção), pela sua estrutura e pelo seu nível de eficiência energética (REDDY e RAY, 2010). Essas variáveis possuem níveis independentes de influência, que podem ser mensurados por meio de análises de decomposição do consumo energético de um setor. Januzzi (2014) define eficiência energética:

“O quê é eficiência energética?” eu respondo que primeiramente temos que deixar mais claro o que entendemos sobre energia, para quê necessitamos de energia. Eficiência energética é aquela energia que você não vê é aquela que você deixa de consumir. Por isso é tão importante desenvolver conceitos e indicadores que nos permitam avaliar e mensurar a quantidade de eficiência energética que temos disponível e como estamos aproveitando esse recurso energético. (JANNUZZI, 2014).

Eficiência energética é um fator importante na redução do impacto ambiental do setor de energia, principalmente no que se refere às mudanças climáticas e ao consumo de fontes fósseis de energia. A eficiência energética é a capacidade de usar menos energia para produzir a mesma quantidade de trabalho ou serviços úteis. Nesse sentido, o impacto que as melhorias na eficiência energética podem ter nos mercados de fornecimento de energia cresce ao longo do tempo (US NATIONAL POLICY DEVELOPMENT GROUP, 2001).

A eficiência energética também contribui para reduzir a dependência externa e as vulnerabilidades do setor de energia. A promoção de eficiência energética está condicionada a otimização desde as fontes primárias até o aproveitamento de recursos. Assim ela contribui adicionalmente para a melhoria da qualidade dos serviços de energia e para a mitigação dos impactos ambientais.

Segundo o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), tanto o consumo específico na produção quanto o custo da energia em si são fatores de competitividade para a indústria. Portanto, o grau de eficiência energética é um fator determinante para competitividade de um setor, pois consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço ou produto com o menor gasto de energia (LAMBERTS *et al.* 2004).

A eficiência de uma unidade produtiva surge com melhores práticas de produção. É um conceito relativo, uma vez que a eficiência confronta o que foi produzido, dado os insumos disponíveis, com o que poderia ser produzido com os mesmos *inputs* (MEZA et al., 2005). Assim, uma unidade é eficiente se maximiza a produtividade; caso contrário, será ineficiente.

Para as indústrias alcançarem a eficiência energética, segundo Kaygusuz (2012) e Tanaka (2011), existem várias formas: (i) investimentos financeiros em melhorias dos

equipamentos, introdução de novas tecnologias e ajustes operacionais, adequando o uso das fontes de energias; (ii) gerenciamento do uso de calor para diminuir perdas energéticas por meio, por exemplo, do aproveitamento de calor e materiais rejeitados e do uso adequado de isolamentos; (iii) e com o reaproveitamento e reciclagem de produtos e materiais.

Outras medidas garantem a qualidade da energia (tensão uniforme, harmônicos, etc.) e qualidade do consumidor, que, para Jannuzzi (2014), é entendido como o nível de informação do consumidor que permite melhor operação dos equipamentos e hábitos que possibilitem realizar um consumo adequado de energia, evitando desperdícios. Para Geller (2003, p. 36):

Uma grande quantidade de avanços de eficiência energética em aparelhos, equipamentos de iluminação, veículos, instalações físicas, usinas e processos industriais foi desenvolvida e introduzida nas últimas décadas. A adoção dessas tecnologias vem se expandindo, contribuindo para uma redução substancial do uso e da intensidade da energia em muitos países.

Segundo Berni e Bajay (2012), a energia poupada significará insumo valorizado como produto a ser vendido, por exemplo, pelas biorrefinarias no futuro, sem contar que a otimização do consumo energético será também importante para a redução de emissões de dióxido de carbono. Nesse sentido, o alinhamento do setor energético com a indústria florestal e com a indústria de celulose, além de criar um novo *player* de negócio, também pode agregar valor aos objetivos da região e contribuir com o desenvolvimento sustentável.

Para Jannuzzi (2002), a maneira geral de medir eficiência energética é por meio de uma razão entre a energia que é utilizada para um processo e a energia resultante desse processo, chamada de energia útil. Porém, o autor afirma que esta é uma definição simplista pois, sempre há perdas de energia em tais conversões.

Na literatura existe um consenso entre autores, como Patterson (1996), Phylipsen, Blok, Worrell, (1997), Jannuzzi (1997), Jannuzzi (2002), Guerra *et al.* (2010), Tanaka (2011), que afirmam que a eficiência energética também é frequentemente medida em termos de indicadores termodinâmicos (eficiência térmica por meio da divisão do total do consumo energético, em quilocalorias pela quantidade total de produto produzido), de indicadores físicos (razão entre consumo energético por unidade de produção física) e de indicadores econômicos (razão entre consumo energético por produção monetária).

A diminuição do consumo específico de energia na produção de um setor específico ou um país (indicador físico-termodinâmico) promove o aumento do nível de eficiência energética, além disso, a “intensidade energética” está usualmente relacionada com o uso de indicadores econômico e termodinâmicos (PHYLIPSEN, BLOK, WORRELL, 1997).

A utilização de indicadores termodinâmicos físicos e econômicos é útil quando comparado aos níveis de eficiência energética entre indústrias em uma mesma economia, uma vez que, por meio da conversão dos diferentes tipos de produtos ou serviços, esses indicadores permitem comparar as quantidades específicas de energia consumida por unidade monetária gerada desse setor. Cada grupo de indicadores tende a servir a um propósito certo e o indicador adequado a ser utilizado depende do objetivo a ser alcançado.

Eficiência energética necessita de investimentos, tecnologia e planejamento para que seja aproveitada (Jannuzzi, 2014). Os investimentos de capital têm retornos provados, mas muitas vezes exigem um gasto financeiro maior que os orçamentos projetados pela indústria, contudo o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas para aumento da eficiência energética é essencial para a redução do desperdício no fornecimento e uso final de energia e consequentemente é uma ação que permite a preservação do meio ambiente.

Segundo Bajay, em entrevista para revista O Papel (2013), a coogeração é um método, *“amplamente usado pelo setor sucroalcooleiro e também pela indústria de celulose e papel, é duplamente interessante, pois resolve o problema de disposição dos resíduos industriais, dispensando o uso de aterros, e ainda atende às necessidades de energia elétrica”*. Nesse caso, ela pode ser identificada como externalidades positivas ao meio ambiente.

Em um contexto geral, a melhoria da eficiência energética significa usar menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou de saída útil. Assim, a oportunidade de converter biomassa e licor negro em bioeletricidade além do incremento da produção, criam novos *players* de negócios para o setor de celulose.

## 2.2 Base Florestal

As florestas possuem papel central para a manutenção das características biológicas e climáticas do planeta, bem como na geração de riquezas pelo uso dos recursos florestais. Alinhar tais expectativas de geração de riquezas implica em uma revisão do modelo de desenvolvimento das nações e na busca por alternativas que estejam em consonância com o conceito do desenvolvimento sustentável (CNI, 2016). Para se adaptar a esse novo contexto mundial, as empresas do setor estão buscando soluções para aprimorar as técnicas de uso da terra, da água e dos demais recursos, conciliando a produção sustentável dos chamados 4Fs - *Food, Fiber, Fuel and Forests* (IBA, 2015).

Segundo dados da FAO (2016), a cobertura florestal mundial é de aproximadamente 4 bilhões de hectares, sendo os países com maior cobertura, respectivamente, Rússia com 20%, Brasil com 13%, Canadá e Estados Unidos com 8%, e

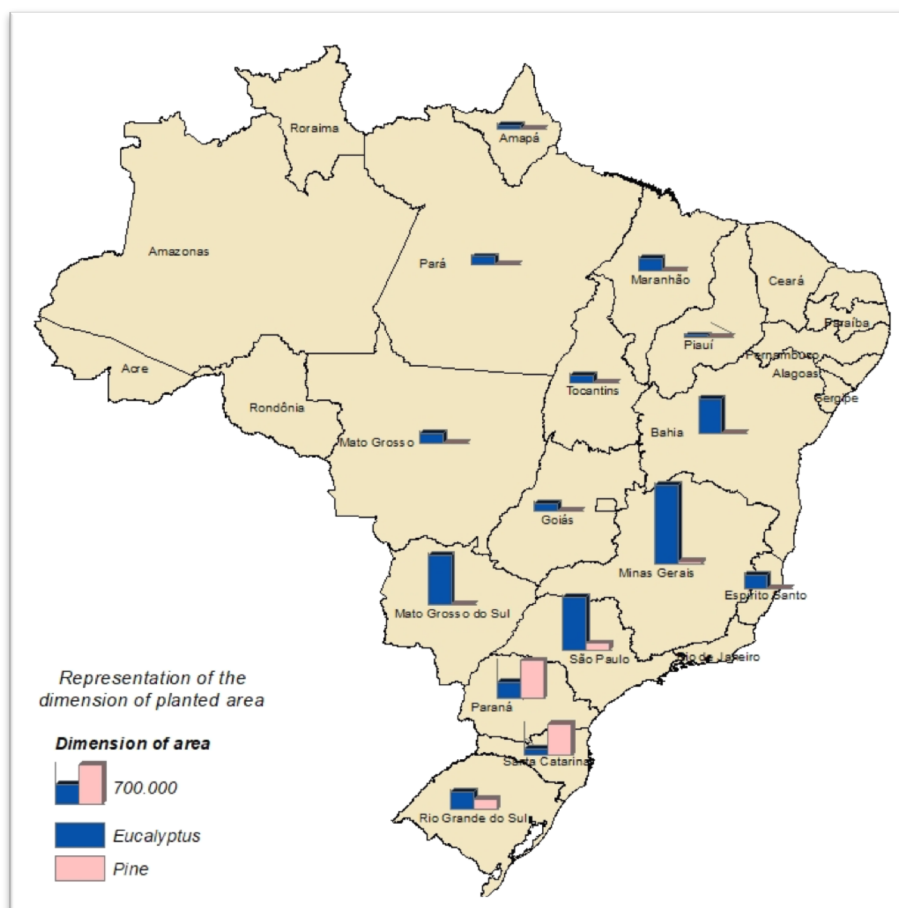


China com 5%, que juntos representam 53% do total. Para a área de florestas plantadas, a China possui a maior quantidade, com 29% do total, seguida pelos Estados Unidos com 10%, Rússia com 6%, Japão e Índia com 4% e Brasil com 3%.

O Brasil é favorecido no cultivo florestal devido às condições climáticas. A área ocupada de floresta representa apenas 7,8 milhões de hectares, que corresponde apenas a 0,9% do território nacional. O setor brasileiro de árvores plantadas é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país, os demais 9% vêm de florestas nativas legalmente manejadas (IBA, 2016). Do total da madeira produzida, 35% é destinado para o setor de celulose e papel que é o responsável pela maior participação, tanto nas exportações, quanto nas importações mundiais de produtos florestais (SELVATTI, 2015).

Os plantios de eucalipto ocupam 5,56 milhões de hectares da área de árvores plantadas no país, o que representa 71,9% do total, e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (24 %), São Paulo (17 %) e Mato Grosso do Sul (15%); os plantios de pinus ocupam 1,6 milhão de hectares e concentram-se no Paraná (42 %) e em Santa Catarina (34 %). A Figura 3 apresenta os dados das áreas plantadas de pinus, eucalipto e outras espécies.

Figura 3 - Representação das Áreas Plantadas do Brasil por Estado e Gênero em 2015.



Fonte: Elaborado pela autora baseado nos dados IBA (2017).

De acordo com os dados mostrados na figura acima, a redução com área plantada de pinus frente ao eucalipto pode ser explicada primeiro em virtude da produtividade do eucalipto no Brasil ser superior ao pinus e segundo, pelo ciclo de produção mais lento (7 anos para o eucalipto contra 15 anos do pinus), que implica maiores custos e elevados períodos de *payback*. Por último, a demanda por eucalipto provém de grandes indústrias de celulose no Brasil, que estão com grandes projeções de crescimento (CARVALHO, 2010).

O mercado mundial de produtos florestais movimentou aproximadamente 230 bilhões de dólares em 2015 (FAO, 2016). No entanto, o Brasil participou de pouco mais de 3% desse mercado, participação incipiente comparada com o resto do mundo (CNI, 2016). Porém, dentre os produtos florestais, a cadeia de celulose e papel é bastante competitiva no Brasil, sobretudo a parte relativa à produção de celulose de fibra curta. A demanda de celulose é também bastante influenciada pelo desempenho do mercado mundial, pois mais da metade da produção do setor é destinada ao mercado externo (EPE, 2015).

O Brasil se destaca na produção mundial de celulose, ocupando a terceira posição no *ranking* dos países produtores de celulose de todos os tipos e a primeira como exportador de celulose de eucalipto (FAO, 2014). Essa produção, na última década, foi impulsionada pelos altos investimentos da indústria de celulose, principalmente no setor energético.

Ainda segundo dados do IBA (2016), no Brasil, 34% das árvores plantadas pertencem a empresas do segmento de celulose e papel, seguida de 29% concentradas com os proprietários independentes e fomentados (pequenos e médios produtores), que investem em plantios florestais como fonte de renda a partir da comercialização da madeira *in natura*. Segundo Fischer (2012), os fomentados se dividem em dois grupos de contratos de longo prazo: os contratos de arrendamento e os de parcerias.

No contrato de arrendamento, a empresa arrendatária assume a posse e a responsabilidade sobre a propriedade da terra, para o fim específico de florestamento e reflorestamento. Sendo todos os custos de produção da floresta assumidos pela empresa e o proprietário da terra recebe pagamentos periódicos, cujo valor varia entre as diferentes regiões do Brasil.

Por outro lado, no contrato de parceria, a diferença está na forma de remuneração, que é feita por meio de um percentual da produção, podendo ser em madeira ou um valor calculado de mercado da produção. Ambas são estratégias para as empresas de celulose aumentar a oferta de madeira. Finalmente com 10,2% estão com os investidores financeiros ou

*Timber Investment Management Organizations -TIMOS*<sup>3</sup>. O Brasil já é o segundo principal destino dos investimentos em ativos florestais, com 29% do montante, atrás somente dos Estados Unidos, que concentram 66% dos investimentos em ativos florestais.

Na teoria econômica clássica, Porter (1990) cita que, para o desenvolvimento das atividades econômicas, é necessária a disponibilidade de fatores de produção (trabalhadores, terra, recursos naturais, capital, infraestrutura etc.) como determinantes do fluxo do comércio. Na atividade florestal o custo da terra pode ser considerado um custo relevante em investimentos dependendo da localização. No entanto, com as modalidades de contrato de fomento esse custo pode ser amenizado e diluído para as indústrias.

Susaeta et al. (2017) ressalta que o impacto das mudanças climáticas, o manejo florestal e os diferentes impactos da produtividade florestal no rendimento da água e os rendimentos do pinho podem ser realçados por mudanças no uso da terra e podem reduzir os distúrbios da floresta que inibem o crescimento das áreas florestais. O custo da terra estabelece as variáveis que compõem as forças locacionais, como o custo de transporte, a estrutura fundiária, a política de desenvolvimento regional, a produtividade da terra, a criação de novas indústrias, entre outros fatores, muito estudados na teoria da localização da indústria (ISARD, 1956), (MOSES, 1958), (FEARON, 2002). Para Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013), a infraestrutura nacional é deficitária e precária, aumentando os custos logísticos no país. Nos Estados Unidos, o custo médio para transportar uma tonelada de celulose até o porto é de aproximadamente US\$ 20, enquanto que no Brasil, o custo médio pode chegar a US\$ 90. (ABRAF, 2013, p. 63-64).

As principais fontes de madeira utilizadas para a produção brasileira de celulose são o eucalipto e o pinus. Espécies do gênero *eucalyptus* dão origem às polpas de fibra curta e as do gênero pinus, às polpas de fibra longa (folhosas e coníferas), variando o comprimento e largura das fibras de celulose de acordo com a espécie (FOELKEL, 2007). Até o ano de 2003, a participação da celulose de fibra longa no mercado internacional era maior do que a de fibra curta, invertendo-se a partir de então (BIAZUS *et al.*, 2010a, p. 125). Fagundes e Schmidt (2011) apontam que as florestas plantadas de pinus estão sendo substituídas pelas de eucalipto, principalmente por conta da maior produtividade e competitividade.

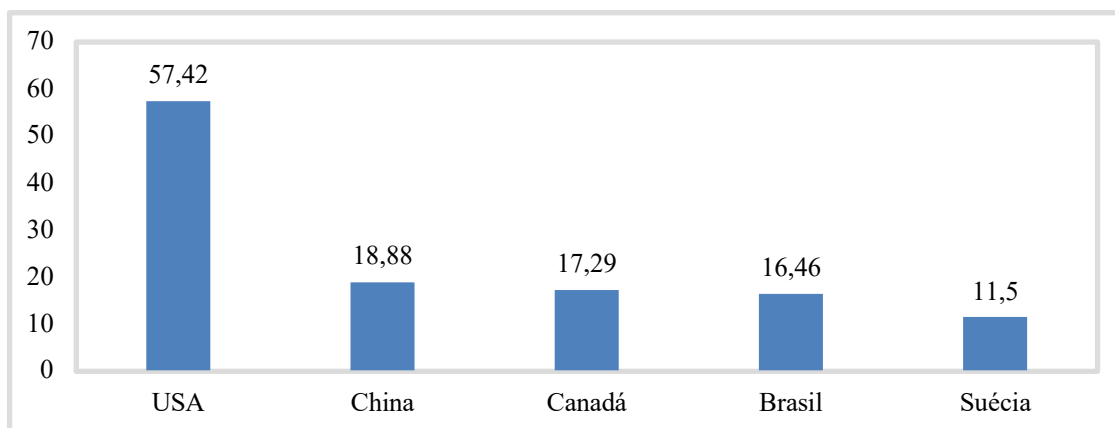
De acordo com os dados parciais obtidos, SECEX (2016), comparando a produção de 2014 de celulose e a produção do ano 2015, o segmento cresceu 8% no ano, atingindo um volume de 11,97 milhões de toneladas de celulose exportada. Esses números são expressivos

---

3 A denominação TIMO vem do inglês é o acrônimo de *Timber Investment Management Organizations*. Essas empresas foram criadas nos Estados Unidos com o objetivo de organizar e administrar as parcerias de investidores institucionais como os fundos de pensão e institutos de seguros com os investimentos florestais. Elas passam a apresentar crescimento significativo naquele país a partir dos anos 1980 e somente se expandem para outros países na última década (SILVA, 2013, p.28)

ao compará-los com a produção dos mercados mais tradicionais dessa indústria, tais como Estados Unidos, China, Canadá e Suécia. O Gráfico 2 apresenta os maiores produtores mundiais de celulose (eucalipto e pinus) e a produção em milhões de toneladas.

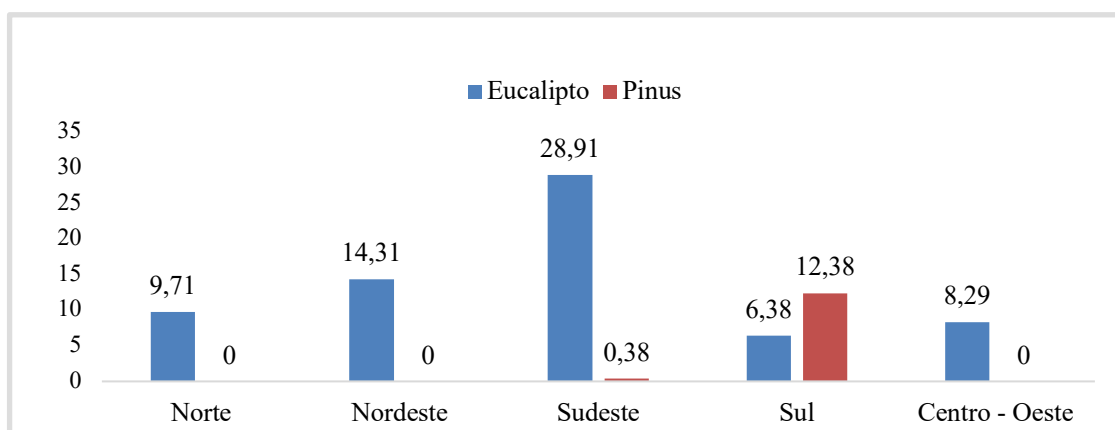
Gráfico 2 - Maiores Produtores Mundiais de Celulose.



Fonte: Adapta do IBÁ, Secex e Pöyry (2014)

As estimativas de volumes de madeiras têm ganhado destaque e importância. A preocupação das empresas florestais é crescente no que diz respeito à determinação do volume de pilhas de madeira em metro estéreo e a sua conversão em metro cúbico. Dessa forma, inventários florestais são executados com o objetivo de fornecer tais estimativas, as quais podem ser traduzidas como a quantidade de madeira por unidade de área e a distribuição dentro dessa área. O Gráfico 3 apresenta o volume em metros cúbicos dos produtos da silvicultura segmentada.

Gráfico 3 - Volume da Silvicultura, por Espécie Florestal 2014.

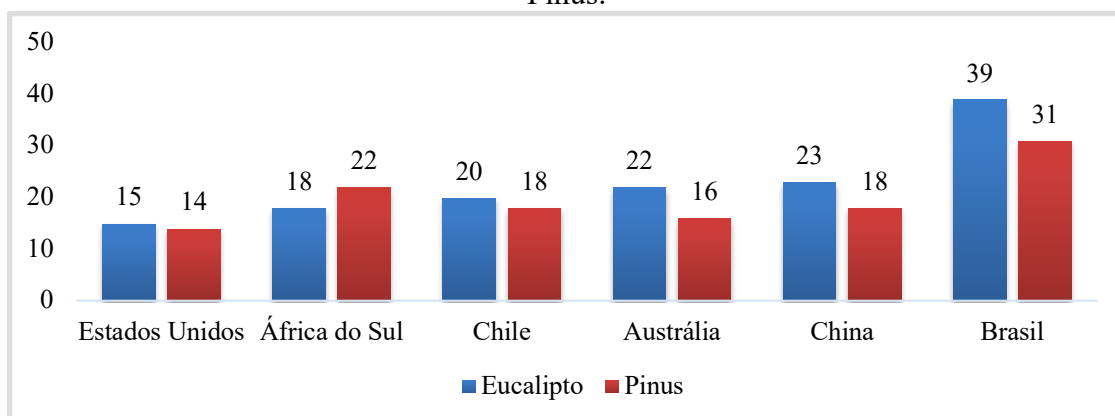


Fonte: IBGE 2015.

O Brasil dispõe de elevados níveis de produtividade, pois as florestas plantadas nesse país são as mais produtivas do mundo, alcançando produtividade e vantagem competitiva

para o setor. O Índice de Incremento Médio Anual (IMA)<sup>4</sup>, apresenta comparação com os países de tradição florestal, conforme dados publicados pelo IBA (2015), apresentados no Gráfico 4, com os índices de produtividade em metros cúbicos por hectare ano dos principais países produtores de floresta de eucalipto e pinus.

Gráfico 4 - Índice de Produtividade em Metros Cúbicos por Hectare Ano de Eucalipto e Pinus.



**Fonte:** Adaptado do IBÁ e Pöyry (2014).

Conforme pode se observar, o Brasil tem uma vantagem competitiva comparado com os principais países mundiais produtores de eucalipto e de pinus. O IMA do Brasil apresenta diferença de aproximadamente 59% de produtividade de eucalipto por metros cúbico por ano a mais que a China, que está em segundo lugar. No entanto, a China<sup>5</sup>, mesmo aparecendo em segundo lugar, tem pouca vantagem em relação aos demais países produtores.

Lima (1993) em seus estudos apresentou a grande vantagem comparativa do Brasil no tempo de rotação de plantações de algumas espécies florestais em diferentes regiões do mundo, sendo o Brasil o país que possui menor tempo na produção de eucalipto e de pinus. Dados coletados do IPEF e da ABRAF mostraram que, com irrigação adicional, a produtividade atual pode chegar a 50 m³/ha/ano, e, com irrigação e fertilização, a produtividade pode chegar a 52 m³/ha/ano (SANTOS JR, 2011).

Desse modo, o Brasil, em virtude de suas condições edafoclimáticas<sup>6</sup> (Assis, 1999; Assis, 2014; Fonseca *et al.*, 2010), da disponibilidade de terras e da tecnologia desenvolvida pelas empresas nacionais, está entre os que melhor podem produzir florestas com valor econômico e estratégico. Outro aspecto relevante nas florestas de eucalipto é ser uma das poucas árvores que, devido às suas características de crescimento é capaz de reduzir a maior

<sup>4</sup> É um indicador da produtividade e crescimento florestal por unidade de área e tempo.

<sup>5</sup> São relativamente poucos conhecidos os dados que estão disponíveis para o domínio público.

<sup>6</sup> Relação espécie-solo-clima para plantio.

distância entre a procura e a produção de madeira ao menor tempo possível (CHANDRA e YADAVA, 1986).

Segundo Marcovitch (2012), para as análises de questões relacionadas com a sustentabilidade, a busca de uma reestruturação na arquitetura financeira global para oferecer bases sólidas a um novo ciclo de desenvolvimento deve ser pautada em tecnologias limpas, energias renováveis e uso sustentável de recursos naturais.

Em consenso com diversos autores (BAJAY, 2010; MARCOVITCH, 2012; ASSIS *et al.* 2016), as indústrias de produtos florestais têm um papel importante no desenvolvimento sustentável global (manutenção da biodiversidade ao ser parte das questões globais da água, ao combate à degradação florestal relacionada com a mudança climática global) devido à sua base única de matérias-primas.

O setor florestal é pautado no cumprimento da regulamentação sobre o uso da terra. Dessa forma, para amenizar os impactos dos produtos sobre o meio ambiente, existe uma série de legislações e novos conceitos de responsabilidade empresarial, com o intuito de promover o crescimento econômico em consonância com as exigências ambientais (LEITE, 2009).

Desde a década de 1980, a certificação florestal voluntária vem tomando espaço no ambiente empresarial pelo Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (INMETRO, 2012). Para Dias (2011), a adoção de novos modelos de gestão é fomentada por diversos fatores internos e externos. Dentre os fatores internos, destacam-se redução de custos; qualidade do produto; melhoria na imagem da empresa; busca por inovação; responsabilidade social; e sensibilização dos clientes internos. Os fatores externos são demanda do mercado (exigências por parte de clientes e consumidores finais); concorrência; poder público e legislação ambiental; meio sociocultural; certificações ambientais; e fornecedores.

Dentre as certificações voluntárias de maior aceitação no mercado internacional pode-se destacar o Forest Stewardship Council® (FSC®); o *Programmer for the Endorsement of Forest Certification Schemes* (PEFC); *International Organization for Standardization* (ISO); e o Programa Brasileiro de Certificação Florestal (CERFLOR). O FSC® Conselho de Manejo Florestal é uma organização internacional não governamental que atua de forma independente e sem fins lucrativos. Sua finalidade é apoiar o manejo economicamente viável, socialmente benéfico e ambientalmente adequado das florestas do planeta, levando em consideração as especificidades de cada região (FSC, 2015).

O PEFC (Antigo *Pan European Forest Certification* – PEFC) foi criado em junho de 1999, baseado em critérios próprios definidos nas resoluções das Conferências de Helsinki e de Lisboa, de 1993 e 1998, sobre proteção florestal na Europa. O órgão tem por objetivo dar garantias aos consumidores de que os produtos com certificado PEFC são derivados de uma

gestão florestal que respeita os três pilares da sustentabilidade: social, ambiental e econômico. Essa certificação assegura a rastreabilidade da matéria-prima desde sua origem até o consumidor final (PEFC PORTUGAL, 2015).

A ISO 14000 foca na gestão ambiental e fornece uma estrutura organizada para que as empresas consigam prover ações internas para obtê-la. É uma certificação de reconhecimento internacional, que possui auditorias ambientais, avaliação de desempenho ambiental, rotulagem ambiental e análise o ciclo de vida dos produtos, adequando-se à legislação ambiental de cada país.

Nesse sentido, algumas empresas tendem a acumular certificações, como é o caso da ISO 14000 atrelada à ISO 9000. A ISO 9000, apesar de não enfatizar especificamente o setor ambiental, tem sido significativamente adotada por se tratar de regras que estabelecem a implantação, o desenvolvimento, a avaliação e a continuidade do Sistema de Gestão da Qualidade (GQ). Com a adoção dessas práticas padronizadas, a ISO 9000 passa mais credibilidade frente aos seus clientes e concorrentes (Moura, 2002).

Ainda sobre o setor florestal, o Sistema Brasileiro de Certificação Florestal (CERFLOR) visa certificar o manejo florestal sustentável e a cadeia de custódia de produtos de base florestal, seguindo os princípios, os critérios e os indicadores aplicáveis para todo o território nacional. Esses critérios são elaborados no fórum nacional de normalização e são integrados ao Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (INMETRO, 2012).

O crescente interesse público e a consciência global sobre questões ambientais e sociais têm intensificado a pressão sobre as empresas da indústria florestal em seus esforços para equilibrar efetivamente as demandas potencialmente conflitantes das partes interessadas (Li e Toppinen, 2011).

É evidente o avanço na adoção de certificações como medidas de sobrevivência e competitividade organizacional. Porém, outras medidas estão sendo buscadas para reduzir os impactos que as organizações e população causam ao ambiente natural. Dentre essas medidas, pode-se citar o uso consciente dos recursos naturais, identificação dos resíduos industriais, descarte correto de produtos obsoletos e criação de fontes de energias renováveis.

As funções produtivas e os plantios de árvores desempenham importante papel na prestação de serviços socioambientais, o que se traduz em conservar a biodiversidade, maximizar a eficiência energética de seus processos produtivos, perseguir um ciclo de produção cada vez mais limpo e diversificar o uso econômico das árvores plantadas para ampliar os benefícios sociais gerados, seja a partir de oportunidades de emprego e renda, seja no envolvimento de pequenos produtores por meio de programas de fomento florestal (IBA, 2015).

Assim, com avanço tecnológico conquistado a partir da biomassa na silvicultura brasileira com o aumento de produtividade, melhoramento genético, redução de custo, dentre outros, é possível considerar um cenário favorável das florestas plantadas como fonte de matéria prima para geração elétrica (MULLER, 2005). Susaeta *et al.* (2009) concluíram que a incorporação de novas tecnologias ambientalmente corretas aumenta o valor da terra e cria externalidades positivas, uma vez que a dependência dos mercados externos de petróleo e as preocupações com as emissões de gases do efeito estufa podem ser atenuadas.

## 2.3 Indústria de Celulose

As grandes indústrias de celulose atualmente estão construindo cadeias produtivas globais para aproveitar as vantagens comparativas regionais com melhor aproveitamento dos fatores de produção (HARLAFTIS, TENOLD e VALDALISO, 2012). Em um contexto internacional, as relações entre transferência de tecnologia e liderança, dependência de matérias-primas e produtos variam globalmente. A questão levantada por Ojala *et al.* (2013) é se o domínio internacional na indústria de celulose e papel é uma função da liderança tecnológica ou se esta é um coproduto do rápido crescimento do mercado.

Para Ojala *et al.* (2013), a disponibilidade de matérias-primas é provavelmente o único determinante de máxima importância para o domínio da indústria. Nesse sentido, a localização geográfica das florestas é um dos principais fatores para domínio da indústria de papel e celulose. Corroboram vários autores que o uso do eucalipto transferiu o domínio da indústria para a América do Sul e o sul da Europa (GUTIÉRREZ-POCH, 2012; LIMA-TOIVANEN, 2012), justificado pelas condições endoclimáticas dessas regiões na produção de florestas.

Nos Estados Unidos, as indústrias de celulose estão localizadas em regiões onde as árvores são colhidas de florestas abundantes ou fazendas de árvores. Mais de 70% da capacidade de polpa de madeira dos EUA está localizada nas regiões do Atlântico Sul e Centro-Sul, próximas à fonte de fibras de madeira (KINCAID, 1998). Por exemplo, somente cerca de 15% da celulose atualmente produzida nos Estados Unidos é destinada ao mercado (LIU e ELIAS, 2003). Assim, a maioria da produção de celulose dos EUA ocorre em usinas integradas que produzem produtos de papel e celulose.

Embora as matérias-primas e os mercados expliquem o surgimento da indústria do papel em diferentes regiões, a dependência do caminho em termos de tecnologia e estruturas institucionais é um fator importante tanto para o sucesso como para o fracasso da indústria. Por exemplo, ambiente institucional favorável pode reforçar ainda mais as possibilidades da



indústria, bem como o *know-how* tecnológico (OJALA e LAMBERG, 2013). Essa é uma questão que pode ser analisada em trabalhos futuros, uma vez que o Brasil é grande exportador de celulose para mercados produtores e especializados na produção de papel.

Outros aspectos considerados são as questões tecnológicas com investimentos maciços em novas plantas industriais e intensificação e melhoria nos processos de produção, a proximidade com o mercado consumidor dos produtos finais, a logística envolvidas nos processos de distribuição dos produtos e o ambiente institucional favorável. Portanto, a busca por melhorias nos níveis de eficiência energética na indústria de celulose pode focar em novos equipamentos, processos e pode envolver a implantação de técnicas de gerenciamento de atividades energéticas (TANAKA, 2011).

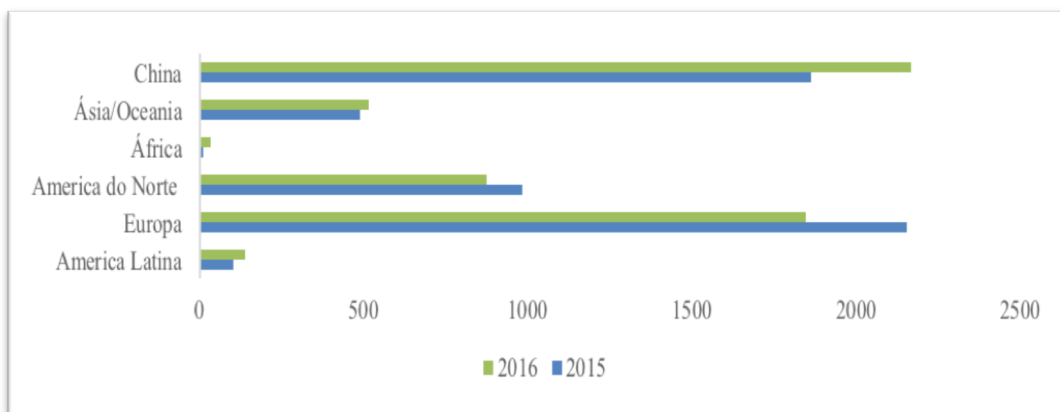
### **2.3.1 A indústria de celulose no Brasil**

A indústria de celulose tem uma participação expressiva no desenvolvimento econômico do Brasil. Segundo o Ministério de Minas e Energia – MME (2016), com a projeção para o cenário macroeconômico de 2016 até 2026, o setor da indústria de celulose agrega vantagens competitivas nacionais e projeta uma taxa de crescimento média de 6,9% a.a. para o período citado, com significativa entrada de projetos mapeados nos primeiros cinco anos.

A indústria de celulose é intensiva em capital e em consumo de energia, bem como possui propriedades sistêmicas que variam de acordo com as características de cada país (MME, 2016). O consumo específico de eletricidade é muito variável nos segmentos de celulose, existindo significativas variações de consumo em função de rota tecnológica, do tipo e da gama de produtos, da idade das plantas, entre outros fatores (MME, 2016).

As indústrias de celulose produzem o principal insumo do papel que é a celulose, por essa razão, na maioria dos países, são integradas as indústrias de celulose com as indústrias de papel. No Brasil, a maior parte da celulose produzida é destinada ao mercado externo. A produção está localizada também próxima às florestas. Regionalmente, a produção está distribuída entre os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Amapá, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul. O Gráfico 5 apresenta os principais destinos da celulose produzida no Brasil no ano de 2015 e 2016, em milhões de dólares.

Gráfico 5 - Principais Destinos da Celulose Produzida no Brasil 2015-2016.

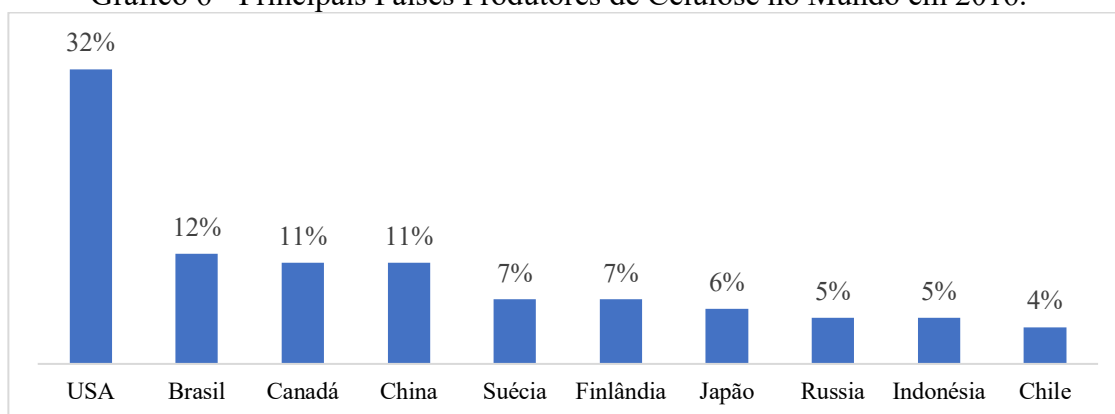


Fonte: Dados Estatístico IBÁ 2017.

A indústria de papel e celulose desempenha um papel importante no *cluster* econômico mundial. De acordo com os dados divulgados pelo IBA (2017), a maior parte do crescimento da demanda de celulose brasileira foi impulsionada pelo consumo chinês, onde as exportações subiram cerca 50% em valores exportados (1.862 milhões de dólares para 2.166 milhões de dólares) em 2016. A demanda chinesa tem crescido rapidamente, em contraste, a América do Norte e a Europa teve retração em 2016 pela celulose de mercado do Brasil (IBA, 2017).

O Gráfico 6 apresenta os principais países produtores de celulose no mundo em 2016, segundo dados obtidos na FAO (2017). Pode se observar que o Brasil ocupa o segundo lugar como produtor mundial de celulose.

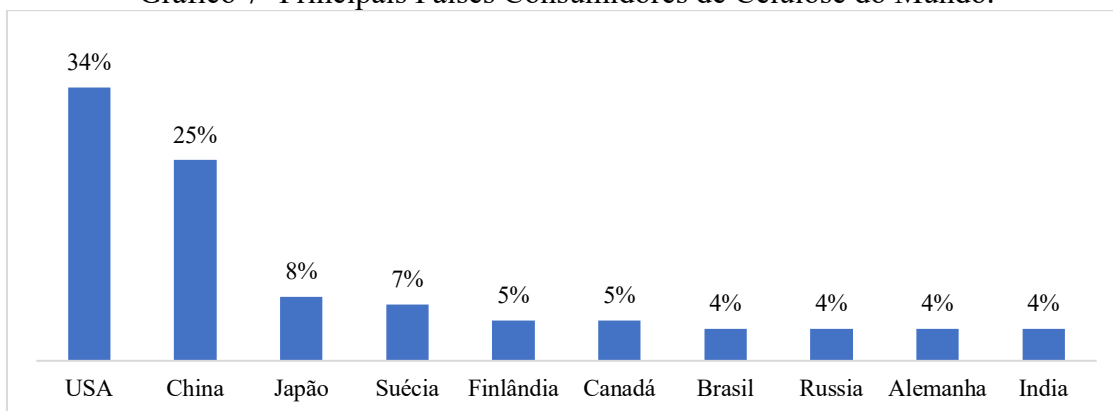
Gráfico 6 - Principais Países Produtores de Celulose no Mundo em 2016.



Fonte: FAO (2017).

No Gráfico 7 são apresentados os principais consumidores de celulose do mundo. Os Estados Unidos mantêm o primeiro lugar em produção e consumo de celulose. No caso do Brasil, o país se encontra em sétimo lugar, em função de não ter participação consistente na indústria de papel.

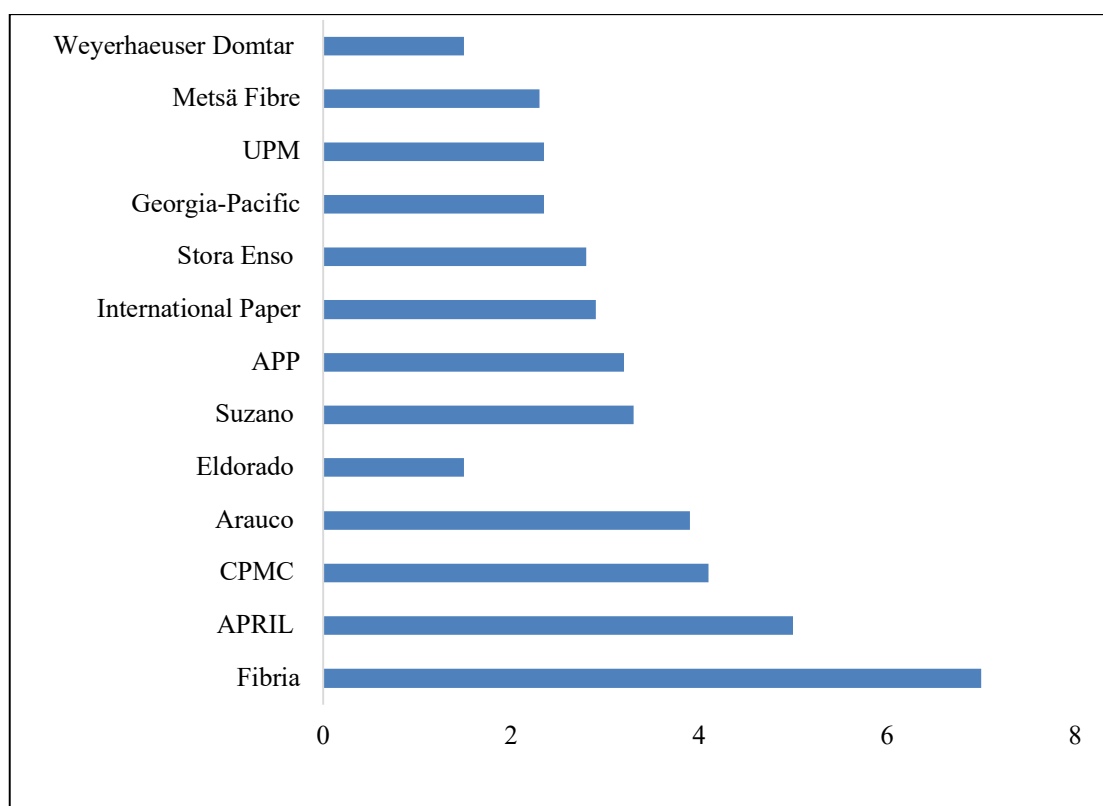
Gráfico 7- Principais Países Consumidores de Celulose do Mundo.



Fonte: FAO (2017)

Economias de escalas nas indústrias de celulose são um fator-chave para o sucesso, uma vez que o investimento em capital é elevado e concentrado em grandes grupos. A capacidade instalada atual é de 54 milhões de toneladas. As maiores empresas mundiais produtoras de celulose de mercado estão representadas no gráfico 8.

Gráfico 8- As Maiores Empresas Mundiais Produtoras de Celulose de Mercado.



Fonte: Elaborada pelo autor através de dados Poyry (2016).

As informações apresentadas a partir dos dados da tabela acima destacam o Brasil como uma das maiores indústrias produtoras de celuloses de fibra curta *Bleached Hardwood Kraft Pulp* BHKP (Polpa Kraft de madeira branqueada - fibra "curta"). Dos 169 milhões de celulose produzidos em 2015, 82% da produção são de processos químicos, com 41% dessa produção de celulose de mercado, ou seja, indústrias que produzem somente celulose, que é objeto deste estudo.

As maiores indústrias de produção de celulose estão concentradas na América, com 14 das 20 maiores empresas (5 na América Latina - Fibria, Arauco, Suzano, CMPC e Eldorado – 8 nos EUA e Canadá – Georgia Pacific, Paper Excellence, Weyerhaeuser, Mercer, Domtar, IP, Resolute Forest e Canfor). Dessa produção, destaca-se a grande participação da fibra curta BHKP com 54% de participação (31 milhões de toneladas) e fibra longa BSKP com 46% de participação (26 milhões de toneladas), sendo que o eucalipto representa 70% dessa produção.

Nesse sentido, pode-se afirmar que o segmento da indústria de celulose é altamente concentrado, depende da localização das florestas. A competitividade das empresas depende, em grande parte, das economias de escala que a indústria consegue alcançar. Assim, investir em novas tecnologias permitirá que essas empresas aumentem a produção por minimizem o desperdício e sejam competitivas mundialmente.

### 2.3.2 Processos produtivos

A produção de celulose evolui continuamente para atender as demandas do mercado, bem como as exigências políticas e ambientais. As indústrias podem produzir apenas a polpa de celulose (plantas autônomas separadas) ou possuir plantas integradas, onde a celulose e o papel, além de outros produtos, são produzidos nas mesmas instalações.

As indústrias de celulose com novos parques tecnológicos são chamadas de biorrefinarias integradas. Porém esse conceito é utilizado há muito tempo, segundo Christine Chirat et al. 2010, já que as fábricas de *kraft* e sulfito sempre trabalharam como biorrefinarias, pois produzem material (fibras), produtos químicos (por exemplo, óleo de tília e terebintina) e a energia necessária para o processo.

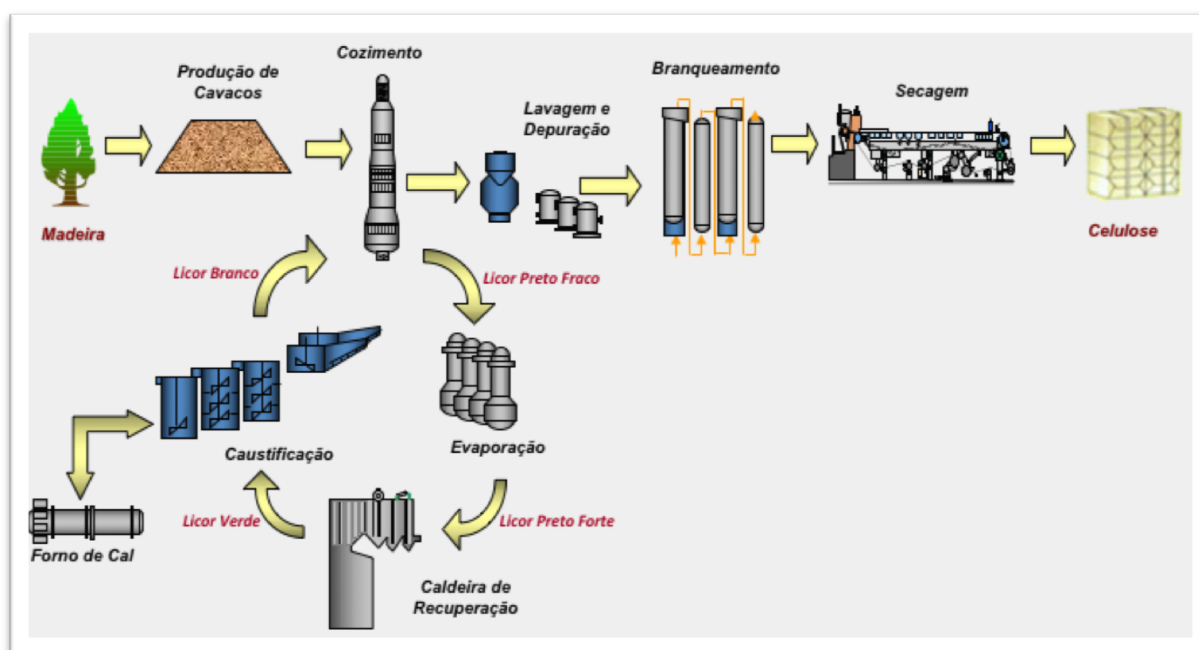
Em usinas *kraft* modernas, a bioeletricidade extra também é produzida e vendida para o mercado. A utilização de madeira e seus componentes para a produção de produtos químicos e energia por formas diferentes do sulfito e *kraft* tem sido uma área de interesse há muito tempo, como resumido por Fensgel e Wegener (1984, apud CHIRAT et al., 2010). Os diferentes processos de conversão e transformações que sofrem a biomassa e licor negro

permitem que o produto de um processo se torne a matéria-prima do processo seguinte, aumentando o número de produtos obtidos em todo o processo produtivo.

Os processos produtivos da celulose são descritos por diversos autores (DEL GRANDE, 2004; AMADO, 2007; MIELI, 2007; GOMES, 2009; BAJAY e SANTANA, 2010; FORTUNATTO, 2014; MEJIA, 2015). O processo será resumido baseado na literatura, na descrição dos processos feitos por Pöyry (2011) e Miranda (2012) e no acompanhamento em visita técnica à Planta Industrial localizada no município de Três Lagoas, MS.

A Figura 4 representa o fluxograma de produção linear do processo *kraft* simplificado básico para a produção de celulose. Na produção de bioeletricidade as operações são as mesmas até a fase de cozimento. O processo da produção de celulose continua em linha e segue simultaneamente para a geração da bioeletricidade, assim, processos comuns à produção da celulose e da bioeletricidade e processos exclusivos de cada produto, mas que acontecem simultaneamente.

Figura 4- Fluxograma de Produção de Celulose e Bioeletricidade.



**Fonte:** Elaborado a partir do processo produtivo e fluxograma industrial.

Conforme Miranda (2012), o processo industrial para fabricação de celulose é complexo e contempla várias plantas interligadas entre si. O autor simplificou a exemplificação conforme experiência profissional na área e dividindo o processo em três grandes sistemas: 1) produção de celulose (pátio de madeira, cozimento, lavagem, branqueamento, extratora e plantas químicas); 2) recuperação química (caldeira de recuperação química, evaporação, caustificação e forno de cal); e 3) utilidades (ar comprimido, torre de resfriamento, estação de

tratamento de água, estação de tratamento de efluentes, estação de tratamento de água para caldeiras, turbo geradores, sistemas elétricos, além dos sistemas de controle e automação).

### **Preparo da madeira**

A primeira fase do preparo da madeira é a descascagem, onde são extraídas as cascas das toras, processo que pode ou não ser realizado no campo. Nessa fase, estima-se que 10 a 20% são dos resíduos aproveitados na cadeia de biomassa. A estocagem de toras para celulose na fábrica é equivalente ao consumo médio de quinze a dezoito dias, sendo sua movimentação feita por equipamentos móveis com guas hidráulicas. As linhas de picagem de madeira são abastecidas pela mesa alimentadora, seguida por transportador de correia e rolos para remoção da casca residual e outros contaminantes, apresentando ainda estação de lavagem de toras e detector de metais para proteção do picador. A estação de classificação e peneiramento de cavacos contempla as peneiras oscilatórias, instaladas após a picagem de madeira e seguem para serem classificados em: cavacos aceitos, finos e rejeitos de maiores dimensões. Os cavacos aceitos são removidos da pilha e estocados em um silo intermediário, de onde são transportados aos digestores. Os materiais não adequados ao processo são também utilizados como combustível nas caldeiras de biomassa. Essa etapa somente demanda eletricidade para a extração das cascas das toras, para a produção e para a separação dos cavacos e o manuseio de materiais.

A estocagem de cavacos normalmente ocorre a céu aberto, com empilhamento e retomada automática, e é constituída por pilha circular tipo *stacker-reclaimer* com sistema de extração por rosca móvel giratória. A capacidade de estocagem é em torno de três dias. Os cavacos retomados da pilha de estocagem são enviados por uma linha de transportadores de correia até o cozimento. A casca residual separada das toras de madeira e os *overs* são picados e enviados junto com os rejeitos do peneiramento (finos) para a pilha de biomassa, a qual alimenta a caldeira de biomassa ou caldeira de força (MIRANDA, 2012).

### **Cozimento/ Polpação**

Após o preparo da madeira, é adotado um dos processos para o cozimento ou polpação de celulose. Os três processos principais para a produção de pasta de madeira são a polpa mecânica, a polpa química e a polpação semiquímica (KINCAID, 1998). A finalidade do cozimento é separar as fibras e os demais constituintes anatômicos dos cavacos de madeira (MIRANDA, 2012). Cada um deles confere certas características à polpa resultante que a torna

adequada para utilizações finais particulares. As fibras são geralmente classificadas de acordo com o seu processo de produção, o tipo e o grau em que são branqueadas. Atualmente o processo de polpação química Kraft<sup>7</sup> é responsável pela maioria da produção de polpa de madeira no mundo, segundo pesquisas de capacidades mundiais de celulose e papel da FAO (2016), que apresenta estatísticas sobre capacidade e tipo de processo de produção de celulose e papel por país (FAO, 2016).

O Kraft é mais utilizado porque a polpa resultante é mais forte e também a eficiência do método do sulfito depende do tipo de madeira que está sendo usada (BAJPAI, 2012). Os principais métodos de separação de fibras estão descritos na sequência.

O primeiro método é a pasta mecânica, que é produzida usando refinadores nos quais as aparas de madeira são submetidas a intensas forças de corte entre um disco de aço giratório e uma placa fixa. Em uma modificação desse processo, as aparas de madeira são pré-amaciadas por calor (polpa termomecânica, ou TMP) para tornar o processo de separação de fibras mais eficaz. Após a trituração, a polpa é separada por triagem em graus adequados e pode, então, ser branqueada para uso em produtos de maior valor agregado. A polpa resultante consiste em uma mistura de fibras inteiras e fragmentos de fibras de diferentes tamanhos.

Há também o processo químico, que é produzido pela combinação de aparas de madeira e produtos químicos em grandes navios, conhecidos como digestores, onde calor, pressão e produtos químicos quebram a lignina e separam a madeira em fibras de celulose. A pasta resultante contém fibras soltas, mas intactas, que mantêm a sua resistência e flexibilidade. Durante o processo, aproximadamente metade da madeira se dissolve no que é chamado de licor negro. A polpa cozida é então lavada e rastreada para se obter uma qualidade mais uniforme, com o licor negro separado da polpa antes do processo de branqueamento.

O terceiro processo é o semiquímico, que é um híbrido dos tipos descritos anteriormente e é fabricado em um processo de dois passos que envolve a digestão parcial com produtos químicos, seguido de tratamento mecânico em um disco refinador. A pasta quimotermomecânica (*Chemi-thermomechanical pulp*, CTMP) é produzida de um modo semelhante ao TMP, mas as aparas de madeira são tratadas quimicamente antes de entrarem no refinador.

Por fim, a pasta reciclada (também denominada de polpa desimpedida) é feita de papel recuperado a partir do qual as tintas e outros contaminantes foram removidos. Muitas folhas de papel de jornal, papel higiênico e tecido facial contêm 100% de pasta de tinta.

---

<sup>7</sup> Desenvolvido pelo químico Carl F. Dahl em 1879 na Alemanha, a palavra “Kraft” é de origem sueca e alemã que significa força (resistência).

O Quadro 1, adaptado de Kramer *et al.* (2009), apresenta uma síntese dos processos de polpação, demonstrando o mecanismo de separação das fibras, o rendimento da massa de celulose, as propriedades e tipos de produtos finais.

Quadro 1 - Síntese dos Processos de Polpação.

Processo de polpação	Mecanismo de separação de fibras primárias	Rendimento (massa de massa de celulose / fibra de fonte original)	Propriedades da celulose	Tipos de produtos
Mecânica	Energia mecânica.	Alta (85-95%) lignina não removida.	Fibras curtas, fracas, instáveis e de alta opacidade; Boa qualidade de impressão.	Papel de jornal, revistas, livros, papelão.
Químico	Produtos químicos e calor.	Baixa (45-50% para celulose branqueada / branqueada, 70% para papel marrom).	Fibras longas, fortes, estáveis.	Sulfito: (papel fino, tecido, vidro, papel de jornal), <i>Kraft</i> : sacos, embalagem, <i>liner board</i> , papel de jornal.
Semi-Químico	Combinação de tratamentos químicos e mecânicos.	Intermediário (55-85%).	Propriedades de polpa “intermediárias.”	Papelão ondulado, embalagens para alimentos, papel de jornal, revistas.

Fonte: Kramer *et al.* (2009) Adapted from U.S. DOE 2005a.

O propósito da caracterização do processo de polpação utilizada na produção de celulose é obter informações que auxiliem o entendimento dos dados da produção total de polpa celulósica da FAO. Os dados são disponibilizados de duas maneiras: como polpa para papel (*pulp for paper*) ou como polpa proveniente de madeira (*mood pulp*). O total de polpa para papel engloba polpa química, mecânica e semiquímica provenientes de madeira, bem como polpas de outros tipos de fibra.

## Depuração e Lavagem

A lavagem tem por finalidade separar a polpa celulósica do licor negro e as impurezas indesejáveis. A etapa de depuração é realizada por meio de filtros rotativos especiais operados em série, com lavagem em contracorrente. A depuração é feita em depuradores centrífugos (peneiras finas) e serve para separar pedaços de cavacos que não foram devidamente desfibrados. A lavagem eficiente é importante para o total aproveitamento do licor negro. O espessamento serve para aumentar a consistência da massa que é, posteriormente, enviada ao branqueamento.



## Branqueamento

O branqueamento da polpa é feito em sequência para otimizar o uso dos reagentes químicos e preservar a resistência e qualidade da polpa. O tipo e número de estágios de branqueamento dependem de limitações quanto à proteção ao meio ambiente, ao uso final da polpa branqueada (qualidade), à alvura objetivo, ao tipo de material fibroso (por exemplo, fibra curta contra fibra longa) e ao número *kappa*<sup>8</sup> da polpa marrom (MIELI, 2007).

O branqueamento é o processo que provoca a maior preocupação ambiental, pois são gerados grandes volumes de produtos químicos. Nesse sentido, existe uma preocupação para minimizar os efeitos ambientais e, ainda, proporcionar uma celulose com alvura aceitável. A polpa branqueada é enviada à torre de estocagem, onde será armazenada à média consistência, e dali alimentada à máquina de secagem. O branqueamento é um processo de purificação da celulose que visa à remoção de elementos que impediriam o seu alveamento completo, tais como resinas e extrativos da madeira, elementos não fibrosos e lignina residual não dissolvida nas operações precedentes (MIRANDA, 2012).

## Secagem

A secagem consiste em retirar a água da pasta de celulose nela contida, que pode ser evaporada por despressurização em tanques de descarga ou secar a pasta na forma de uma folha depositada em uma tela contínua, cortando-a em tamanho adequado para o enfardamento. Com o propósito de produzir folhas de celulose com o mínimo de defeitos e no menor tempo possível. Assim, a folha de celulose é formada, cortada e enfardada para ser comercializada.

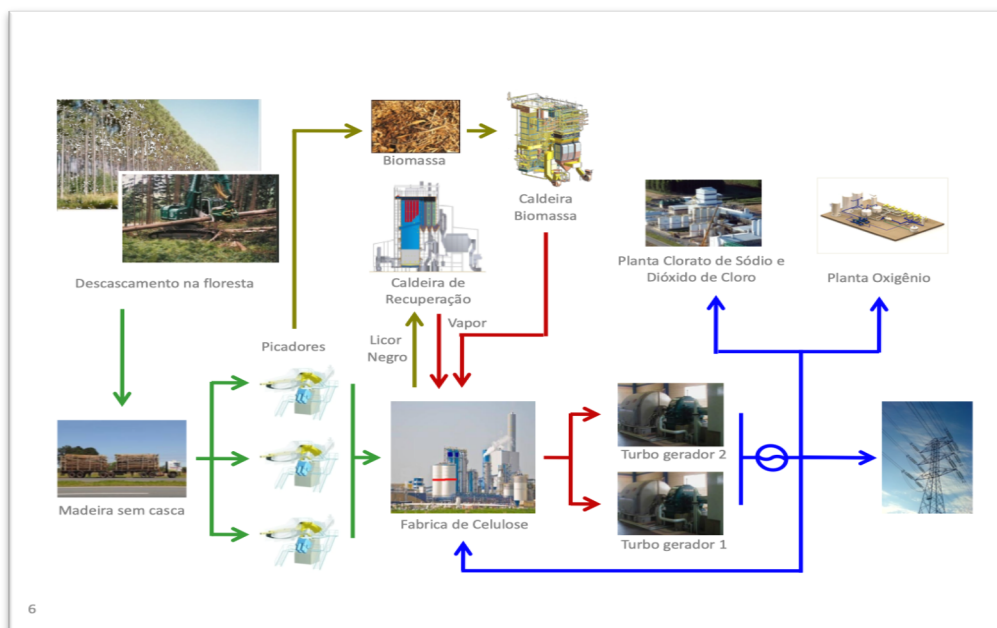
## Unidade de recuperação

A unidade de recuperação é uma das mais importantes para as indústrias de celulos, sua função é recuperar o químicos licor negro gerado do processo de cozimento e os cavacos não aceitos para gerar o vapor que é transformado em bioeletrecidade. A Figura 5 representa o processo de produção de bioeletrecidade.

---

<sup>8</sup> Número *Kappa*: mede o conteúdo de lignina na polpa.

Figura 5- Produção de Bioeletricidade.



*Fonte: Elaborado a partir do processo produtivo fluxograma industrial.*

Os evaporadores têm objetivo de concentrar a quantidade de licor negro (14,9% para 80%) para envio à caldeira de recuperação de sólidos. Possibilitam a recuperação de reagentes químicos, que retornam ao cozimento e o aproveitamento da energia térmica para a geração de vapor, que é utilizado em várias etapas do processo produtivo, até mesmo nos turbo geradores, para a produção de energia elétrica. Os condensados produzidos na planta de evaporação serão segregados em diferentes graus de qualidade. Essa segregação é, portanto, importante para garantir a qualidade suficiente nos condensados que serão utilizados em outras áreas da fábrica.

A caldeira de recuperação tem por finalidade recuperar os produtos químicos usados no cozimento, reduzir os produtos químicos (sulfato de sódio para sulfeto de sódio) e gerar vapor por meio da utilização da energia resultante da queima da matéria orgânica extraída da madeira. Assim, os produtos orgânicos são completamente oxidados para fornecer calor para a geração de vapor de alta pressão (HP) que é usada em uma turbina de vapor de contrapressão para gerar bioeletricidade.

A caldeira de biomassa complementa a quantidade de vapor gerado na caldeira de recuperação para suprir as necessidades da fábrica, para geração de energia e para o processo. Os rejeitos do pátio de madeira serão misturados e enviados aos silos para a queima na caldeira. O óleo combustível será utilizado para auxiliar e também por ocasião da partida e das paradas.

O vapor produzido pela caldeira de força será enviado para o turbo gerador e misturado com vapor da caldeira de recuperação.

Bioeletricidade é o processo de transformação de energia térmica do vapor de alta pressão em energia mecânica, que serve para acionar os geradores de energia elétrica onde é realizada a cogeração em algumas indústrias no Brasil. Os vapores de alta pressão provenientes das caldeiras de recuperação e de biomassa que utilizarão preferencialmente licor preto (biomassa líquida) e biomassa, respectivamente, serão enviados aos turbo geradores e sairão vapores de média e de baixa pressão para serem usados no processo. Uma parte do vapor excedente não utilizado no processo será extraído a vácuo e condensado no condensador da turbina.

O potencial teórico de geração de bioeletricidade é aquele onde todos os rejeitos e licor negro são reaproveitados dentro da unidade industrial. Sendo assim, os rejeitos de madeira e subprodutos são reaproveitados, ou seja, esse processo, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável, agrega valor ao segmento de celulose. Dessa forma, diminui a dependência de combustíveis fósseis para os processos industriais de produção de celulose e, a cada árvore colhida, é gerado um valor adicional na geração de bioeletricidade.

Muitas oportunidades existem dentro da indústria de celulose para reduzir o consumo de energia e aumentar a produtividade. As oportunidades de eficiência energética devem ser prosseguidas de forma coordenada em vários níveis dentro de uma instalação. Outro ponto relevante neste estudo é que a bioeletricidade produzida pode ser considerada uma externalidade positiva, uma vez que a indústria deixa de consumir eletricidade da rede convencional e, conseqüentemente, a indústria de celulose produz um excedente de bioeletricidade, que alimenta a matriz energética com energia renovável obtida por meio de processos sustentáveis.

A produção de celulose e bioeletricidade é dada pelo alinhamento da indústria de produtos florestais e as mais modernas tecnologias de produção de celulose. Dessa forma, agrega os objetivos do setor ao desenvolvimento sustentável, gerando desenvolvimento social (empregos no campo e na indústria), eficiência energética, contribuição para a diminuição de emissão de gases de efeito, dentre outros, ou seja, agrega valor também na rentabilidade da indústria de celulose, tornando-a mais competitiva e atraindo os produtos finais.

## **2.4 Externalidades**

Em economia, externalidade é definida como uma consequência indireta de produção ou consumo que afeta não o produtor ou consumidor, mas um terceiro, ou seja, a

sociedade como um todo ou alguma subpopulação. Como os custos e benefícios das externalidades não estão incluídos no preço do produto, elas têm o potencial de distorcer os mercados, onde os preços são teorizados para refletir o valor real. A teoria das externalidades desenvolvida no último século busca contemplar ferramentas e técnicas para melhorar o bem-estar social e econômico da sociedade.

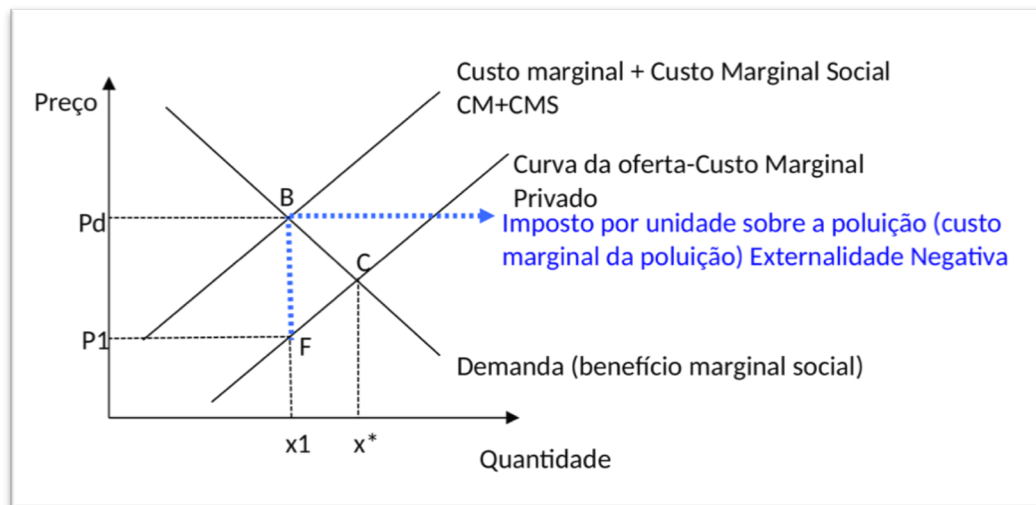
As externalidades podem ser consideradas como um dos fundamentos da economia ambiental. As contribuições históricas que foram realizadas desde o início do século, como o conceito de economias externas por Marshall. Estudos sobre poluição como externalidades, ou teoria do bem-estar desenvolvido por Arthur Pigou na década de 1920, posteriormente por Coase (1960) e aplicado por inúmeros pesquisadores desde então (BATOR, 1958; MISHAN, 1971; BAUMOL e OATES, 1975; HELLER e STARRETT, 1976; LAFFONT, 1988; HELLER e STARRETT 1988).

Em 1920, Arthur Cecil Pigou publicou a obra “*The economics of welfare*”, na qual fez uma análise sobre as externalidades negativas. Ao afirmar que as externalidades causam os conflitos que a teoria de Pareto procura resolver. Para resolver esses impasses causados pelos efeitos negativos na utilização dos recursos naturais por mais de um agente, o autor propõe a intervenção do Estado. Assim, seria possível a correção das externalidades negativas mediante a inclusão de taxas e impostos pelo Estado, ou seja, da diferença entre o custo marginal privado e o custo marginal social. “A imposição ao poluidor deste ônus tem sido encarada de modo geral como um tributo corretivo” (CÁNEPA, 2003, p. 62), pois ao penalizar os agentes causadores das externalidades, por meio da cobrança de impostos, os custos desses agentes aumentarão, fazendo, assim, com que eles considerem os efeitos externos de suas ações.

Na Figura 6 observa-se que a curva da demanda intercepta a curva da oferta de mercado no ponto  $C = (x^*, p^*)$ . Se não há externalidades na produção do bem e todos os demais mercados estão ajustados no ponto C, representa-se o ótimo de Pareto. Entretanto, na presença de uma externalidade negativa,  $t = BF$  por unidade produzida (soma dos custos privados), perde-se o ponto ótimo, ou seja, não há mais a igualdade entre preço e custo marginal.

Impondo-se um tributo (por unidade produzida) igual ao valor da externalidade, a curva de custo marginal privado global passa a ser corrigida e tem-se uma nova curva de oferta, que reflete tanto os custos marginais privados (CM) quanto o custo marginal social (CMS). Como resultado dessa operação, o preço do produto para os consumidores aumenta e eles passariam a pagar um preço realista, bem como haveria uma diminuição da quantidade transacionada do bem. Esse procedimento surtiria como efeito a diminuição da pressão sobre os recursos ambientais (CÁNEPA, 2003).

Figura 6 - Correção de Externalidades Negativas por Taxas Pigouvianas.



Fonte: Cánepa (2003).

Isso equivale dizer que, para Pigou (1920), no princípio denominado *Pollute's Pays Principle* (Princípio do Poluidor Pagador), se o agente causador da externalidade negativa pagar um imposto, e o valor for correspondente ao custo social pela utilização dos recursos naturais for meio da cobrança de impostos. Isso quer dizer que, os efeitos externos causados ao meio ambiente foram pagos, neste caso, não haveria motivos para empresas poluidoras deixarem de poluir (VIVIEN, 2000).

Ronald Harry Coase, economista britânico laureado com o Prêmio Nobel de economia em 1991, publicou em 1960 o artigo “*The Problem of Social Cost*” no “*Journal of Law and Economics*”, no qual abordou a divergência entre agentes econômicos frente às externalidades. O texto apresenta críticas à solução apresentada por Pigou (1920) para as externalidades e aborda o direito de propriedade, bem como expõe vários exemplos de externalidades extraídos de decisões de tribunais americanos e britânicos.

Uma das críticas atribuídas por Coase (1960) à abordagem de Pigou (1920) é que cada situação resultaria em um tributo diferente e, em um ambiente com informações assimétricas, seria inviável para o Estado acompanhar as ações de cada um dos agentes e avaliar seus resultados. Assim, a taxação e o controle estatal propostos por Pigou (1920) comprometeria os custos na produção de um dos agentes.

Para Coase (1960), a solução viria por meio de acordos entre as partes envolvidas, não onerando arbitrariamente a produção ou consumo de nenhuma delas, mantendo o nível ótimo de bem-estar. Sintetizando o trabalho de Coase (*apud* MANKIW, 2006, p.210-211):

Os agentes privados podem solucionar o problema das externalidades entre si, desde que os custos de transação não sejam excessivos. Qualquer que seja a

distribuição inicial dos direitos, as partes interessadas sempre podem chegar a um acordo pelo qual todos ficam numa situação melhor.

Portanto, a importância do trabalho de Coase (1960) é que ambos os participantes de uma externalidade poderiam encontrar uma solução aceitável para maximizar o bem-estar social, sem necessidade de intervenção do Estado.

A partir dos trabalhos iniciais de Pigou (1920) e Coase (1960), muitas definições foram sugeridas para esse conceito, mas não é fácil defini-lo precisamente a fim de que se cubram adequadamente todos os vários exemplos que surgiram em aplicações e ilustrações das externalidades. De fato, neste estudo tentou-se buscar os fundamentos para posteriormente identificar as externalidades no setor da indústria de celulose.

Bator (1958) deu uma definição mais ampla de externalidades, que abrange todas as possíveis causas de falha e ineficiência do mercado: "economia externas, indivisibilidade, não-apropriação, interação direta, bens públicos, atmosfera, etc." (BATOR, 1958, p. 356). Baumol e Oates (1975, p. 15) afirmam que, "em última análise, as definições são uma questão de gosto e conveniência". Assim, Bator (1958) tentou ampliar a definição para incluir todos os tipos de falhas de mercado; ele enfatizou:

Em sua versão moderna, a noção de economias externas propriamente ditas[...] a variedade tecnológica de Viner pertence a uma doutrina mais geral de "interação direta". Essa interação [...] consiste em interdependências que são externas ao sistema de preços e, portanto, inexplicáveis pelas avaliações de mercado. Analiticamente, implica a não-dependência de várias funções de preferência e de produção (1958, p. 358).

Laffont no "*New Palgrave Dictionary*" (LAFFONT, 1988, p. 263) aponta que:

A formalização da externalidade é conseguida na microeconomia, fazendo com que conjuntos de consumo, funções de utilidade e conjuntos de produção (ou funções) sejam afetados por externalidades funcionalmente dependentes das atividades dos outros agentes.

Laffont (1988) seguiu a abordagem de equilíbrio geral e começou a trabalhar nesse tópico. Alguns anos mais tarde, em um livro dedicado à economia pública, Laffont (1988) tem quase a mesma interpretação de Starrett (1988) que, "uma externalidade existe quando as ações de um determinado grupo de agentes econômicos têm repercussões econômicas significativas sobre agentes externos ao grupo". No entanto, o autor acredita que pode criar um mercado para cada atividade de agente em relação às outras e, então, não há mais efeito externo (LAFFONT 1988, p. 14).

Da mesma forma, Baumol e Oates (1975) enfatizam essa característica da não intencionalidade da externalidade. Seguindo a abordagem de equilíbrio geral, caracterizam-na como direta e sem preço, isso é, a atividade de um agente que afeta a utilidade ou função de produção de outros agentes, mas que "não recebe (paga) em compensação por essa atividade". Contudo acrescenta uma condição: que essas externalidades que entram na utilidade ou função de produção de A têm "valores que são escolhidos por outros sem atenção especial aos efeitos sobre o bem-estar de A" (BAUMOL e OATES, 1975, p.16).

Entretanto, há dificuldades consideráveis em tornar esse conceito preciso, principalmente relacionando-se com o significado operacional de "significativo", uma vez que praticamente todas as ações econômicas que alguém toma tem algum impacto sobre algum outro agente (STARRETT, 1988).

Essas definições já preconizavam os estudos das externalidades ambientais, cuja pesquisa se tornou cada vez mais importante a partir do início dos anos 1960. Cada uma dessas contribuições citadas anteriormente tentou estabelecer quais tipo de fenômenos, interdependências individuais e externalidades deveriam ou não englobar.

#### **2.4.1 Externalidades positivas e negativas e seus impactos**

As externalidades podem ser classificadas como externalidades positivas e negativas, de acordo com seus efeitos e podem ser separadas à medida que a produção e o consumo são obtidos, de acordo com suas fontes (PARKIN, 2010, p. 374). A externalidade positiva surge quando a ação de um indivíduo, grupo ou empresas confere benefícios a outros; já a externalidades negativas surgem quando a ação de um indivíduo, grupo ou empresas produz efeitos nocivos sobre os outros.

Nusdeo (2015, p. 127) exemplifica como externalidades positiva, as florestas em crescimento que captam o carbono da atmosfera, aliviando os efeitos do aquecimento global e beneficiando todo o planeta. Para Teixeira (2012, p. 134), um produtor rural que planta árvores nativas ao longo de um rio contribui para a redução do processo de sedimentação desse corpo hídrico, evitando custos associados à qualidade da água para os usuários da bacia a jusante.

As externalidades, quanto às suas características, podem ser, segundo Eaton e Eaton (1999, p. 550):

- Consumo-consumo, nas quais os consumidores são tanto as fontes como também os receptores das externalidades;
- Produção-produção, nas quais os produtores são tanto as fontes como também os receptores das externalidades;

- Consumo-produção, quando um ou mais consumidores são as fontes e um ou mais produtores são os receptores da externalidade;
- Produção-consumo, ocorre quando um ou mais produtores são as fontes e um ou mais consumidores são os receptores da externalidade.

Tanto a teoria de Pigou (1920) quanto a de Coase (1960) admitem a possibilidade da ineficácia no tratamento das externalidades, mesmo que o primeiro proponha a cobrança de taxas e o segundo, a livre negociação entre as partes envolvidas. Ambos admitem que o mercado irá definir como compensar os desgastes ambientais causados pelo processo produtivo dos agentes envolvidos.

Um dos impulsos para produzir uma externalidade positiva ou negativa é a mudança estrutural no setor de produção de celulose (por exemplo, instalação de uma nova planta produtiva, mudança no volume de produção ou custo de geração de energia, dentre outros). Essa mudança pode ser transferida para a economia, alterando a oferta de energia ou a demanda por produtos que são usados no setor de celulose. Percebe-se que os serviços ambientais podem ser considerados, nesse caso específico, como externalidades positivas, pois não são compensados pelos benefícios que geram. Stanley L. Brue (2006, p. 63) aponta outro exemplo no qual a expansão de uma empresa em um mercado pode aumentar as economias externas em todo o mercado, o que reduzirá os custos de produção de outras empresas.

As externalidades, neste estudo, estão relacionadas com o resultado da interação entre o setor de energia, da base florestal, da indústria de celulose e o sistema econômico do país. Portanto, a distinção entre esses setores é essencial, uma vez que estão sendo consideradas a produção de bioeletricidade e a eficiência energética da indústria de celulose como externalidades positivas. Assim, a distinção entre os setores para fins analíticos ajuda a explicar o processo de formação de externalidade, corroborando com a maioria dos autores que convergem a um significado mais tradicional de externalidades, próximo aos impactos ambientais.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Importantes estudos foram realizados sobre a produção de energias renováveis e geração de bioeletricidade proveniente de biomassa, principalmente no setor de biomassa florestal e sucroalcooleiro. Foram desenvolvidas diversas pesquisas sobre eficiência energética nas indústrias e aplicadas várias metodologias para mensurar suas externalidades, em especial as ligadas ao consumo e produção de energia elétrica, de modo que as barreiras e as dificuldades estão sendo apontadas com significativo avanço durante as últimas décadas. Portanto, trata-se de um campo já explorado, mas ainda há muito caminho para percorrer, principalmente no que diz respeito à utilização da biomassa nas indústrias de celulose e do ponto de vista da eficiência energética e utilização dos recursos naturais.

Nesse contexto, o objetivo principal deste capítulo é realizar uma análise das metodologias utilizadas para identificar as externalidades e mensurar o *rankin* de eficiência das empresas, tomando como ponto de partida estudos com diferentes abordagens metodologias que identificam as externalidades. Posteriormente, elas são identificadas e contrastadas com resultados já apresentados em outras áreas e em diferentes países.

As abordagens de modelagem podem ser classificadas como: *bottom-up* ou *top-down*. As abordagens *bottom-up* consideram as influências desagregadas locais, a fim de determinar os impactos globais associados a um determinado produto, processo, serviço ou indústria. É uma abordagem detalhada e que parte de baixo para cima, portanto, requer coleta de inventários de energia, ambientais, econômicos e insumos materiais para os vários processos (GOWREESUNKER, 2015).

As abordagens *top-down* referem-se à decomposição de determinadas variáveis ou cenários em conjuntos de equações, onde o parâmetro necessário é obtido a partir de uma combinação das variáveis consideradas como causas subjacentes para as mudanças observadas, de acordo com o método (matemático) usado para realizar a decomposição (SEIBEL, 2003).

Na abordagem *top-down*, o cálculo dos impactos é feito de forma agregada, normalmente a nível regional ou nacional com a definição do todo, enquanto que na abordagem *bottom-up*, são dadas estimativas específicas do modelo em subsistemas até completar o sistema completo; em outras palavras, a abordagem *top-down* é a nível macro, enquanto abordagem *bottom-up* é a nível micro.

Rowe *et al.* (1995) analisaram as externalidades em um estudo *bottom-up* baseado em "A abordagem da função de danos". Nele, os custos dos danos são estimados para vinte e três novas opções de recursos energéticos, carvão, petróleo, gás natural, nuclear, resíduos sólidos urbanos, hidroelétrico, biomassa, eólico e solar. As taxas de emissão de ar padrão, uso

da terra e outras características são especificadas para cada instalação no modelo. O estudo utilizou a valorização de custo de controle para estimar o custo ambiental associado a várias emissões atmosféricas. Para outros impactos do estudo, usa-se o método de avaliação contingente.

Ott, W. (1997) pesquisou sobre os custos externos no setor energético da Suíça. Utilizou a metodologia "A abordagem da função de danos". Para a quantificação das informações disponíveis sobre os efeitos físicos das externalidades identificadas, foram coletadas e avaliadas as variáveis poluição do ar, derramamentos de óleo, saúde, dentre outras. Danos para a saúde humana foram baseados em um estudo alemão, que foi transferido para a Suíça. A avaliação econômica é pautada na abordagem do capital humano, custos reais (que inclui apenas as despesas no setor da saúde, salários e prestações de doença para os funcionários incapazes de trabalhar).

Schleisner e Nielsen (1997) avaliaram os custos externos relacionados às tecnologias de produção de energia com a implementação nacional na Dinamarca. A avaliação das externalidades dos ciclos de combustível selecionados emprega uma metodologia *bottom-up*, com uma abordagem específica do local, ou seja, considera-se o efeito de um ciclo de combustível adicional, localizado em um lugar específico. O estudo estimou os custos dos danos relacionados aos diferentes ciclos de combustível. A quantificação dos impactos foi alcançada por meio da abordagem da função de danos. O estudo utilizou uma abordagem unificada para assegurar a compatibilidade entre os resultados, por meio do uso do pacote de *software Eco Sense*, que avalia os impactos ambientais e os custos externos resultantes de sistemas de geração de energia elétrica. O sistema tem um banco de dados do ambiente, tanto a nível local quanto regional, incluindo população, culturas, florestas e materiais de construção.

Coelho (1999) ressaltou um mecanismo para implementação da cogeração de eletricidade a partir da biomassa e propôs um modelo para o estado de São Paulo. Apresentou as vantagens de se produzir eletricidade a partir de biomassa e da venda de excedentes de eletricidade por cogeneradores. No entanto, para a cogeração no setor sucroalcooleiro existem inúmeras barreiras, principalmente econômicas e de políticas institucionais. Para o setor elétrico, as vantagens se devem principalmente à possibilidade de aumentar a oferta de energia, em vista da situação de crise do setor energético. Dentro desse panorama, existem perspectivas de introdução de mecanismos que permitam e incentivem a compra de energia de usinas e destilarias do setor sucroalcooleiro do país. Para o setor sucroalcooleiro também são conhecidas as vantagens da venda de excedentes de eletricidade.

Menkes (2004) avaliou a efetividade da eficiência energética enquanto instrumento de política ambiental, por meio de estudos de caso de cinco países - França, Reino Unido,

Canadá, Estados Unidos e Brasil. Dentre as conclusões do seu estudo, destacam-se as questões ambientais como um dos principais motivos para a implementação de eficiência energética nos países desenvolvidos. O autor destacou também que a interação entre programas de eficiência, como água, energia e reciclagem, possibilita a economia de recursos naturais. O investimento em eficiência energética permite um retorno de cerca de 20% a 25% dos recursos a curto prazo e pode possibilitar, a longo prazo, mais de 100% de retorno, sem contabilizar os ganhos ambientais. Constatou-se, ainda, que a política de eficiência energética exige a consolidação de parcerias do setor público com o setor privado e que a participação social é imprescindível para a melhoria da eficiência.

Velázquez (2006) apresentou as perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação ou turbina a gás. A análise de viabilidade econômica da geração de excedentes, por meio da termo-economia, com base no conceito de ex-energia, é a metodologia mais adequada para analisar processos de cogeração. Apesar da maior eficiência, a eletricidade excedente em algumas das configurações estudadas, apresentou custos de geração que não se mostram competitivos com as tarifas elétricas ofertadas pelas concessionárias, deixando evidente a necessidade de outros mecanismos que possibilitem a implementação de novas tecnologias, como a incorporação das externalidades e o abatimento dos créditos de carbono dos custos de geração. Além do entrave tecnológico, há o elevado custo na implementação de nova tecnologia.

Junior *et al.* (2011) realizaram a aplicação da abordagem não paramétrica, utilizando o modelo DEA para avaliar a eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste do estado de São Paulo. O objetivo foi analisar a relação entre o tamanho e o processo operacional de usinas de açúcar e álcool. Para isso foi conduzida uma *survey*, que quantificou o consumo dos principais recursos (*inputs*) e a geração dos produtos (*outputs*) de uma amostra aleatória composta por vinte e seis usinas da região estudada, o que permitiu a classificação do tamanho. Além disso, foi criado um *ranking* de eficiência operacional por meio da DEA, cujas variáveis foram selecionadas pelo método *stepwise*. Os resultados sugerem que não existe uma relação direta entre tamanho e eficiência operacional. Podem ser evidenciados os aspectos técnicos associados aos recursos utilizados e, assim, essa pesquisa fornece subsídios para que os gestores das usinas da região estudada possam melhor estruturar suas estratégias operacionais.

Castro, Brandão e Dantas (2010) fizeram uma revisão bibliográfica, analisaram dados estatísticos e tiveram reuniões técnicas com os principais *players* do setor, Única, Cogen-SP, Dedini e BNDES. Nesse estudo foi destacado o ciclo expansivo da produção de etanol e

de açúcar que garante a biomassa residual necessária para obtenção de grandes montantes de bioeletricidade nos próximos anos. Entretanto, a viabilização desse potencial depende das rotas tecnológicas que serão empregadas, sobretudo se a palha será utilizada como combustível e em qual proporção.

Em 2011 foi realizado o *benchmarking* de fábricas de celulose e papel no Brasil, pela Bachmann e Associados (2011) em parceria com a Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) e foram analisados os parâmetros de desempenho de fábricas, visando o aumento da competitividade. Os dados fornecidos e os resultados são mostrados de forma codificada. Os métodos de cálculo dos indicadores foram padronizados em conjunto com as comissões técnicas da ABTCP e com a Associação Brasileira de Recursos Humanos (ABRH), o que possibilitou que esses sistemas fossem comparados com outros de tecnologia e porte semelhantes. Foram apresentadas trinta e duas métricas para análise do desempenho das fábricas, dentre elas, o indicador que mede o consumo específico de energia elétrica que tem finalidade de avaliar a eficiência energética da produção de celulose.

Berni e Bajay (2012), em seus estudos, apresentam os produtos que podem ser obtidos em biorrefinarias por meio de uma tecnologia de conversão da biomassa. As biorrefinarias podem usar uma grande variedade de insumos e/ou matérias primas. O estudo apresentou uma visão geral das opções de biorrefinarias para as indústrias de celulose e papel brasileiras, destacando o complexo processo de tomada de decisão por parte dos *players* do setor, devido ao fato da evolução das biorrefinarias concentrarem mais tecnologias de processo. A pesquisa apresentou a necessidade de avaliação conjunta das tecnologias de processo, matérias primas e alternativas abertas com a implementação de ações de eficiência energética que, por meio da energia economizada, representam insumo a ser valorizado como produto em plataformas químicas nas biorrefinarias. Além disso, mostrou-se que as biorrefinarias são uma grande oportunidade de agregar valor aos negócios das empresas brasileiras, sobretudo em novos negócios alinhados a ganhos de competitividade e ao fortalecimento das bases sustentáveis do agronegócio nacional pelo setor de celulose e papel.

Tanaka (2011) estudou a eficiência energética e a conservação como um dos principais componentes para atender a segurança energética. O estudo concentrou-se na indústria e forneceu bases para as análises de políticas para melhorar a eficiência energética e a conservação na indústria. A partir das estatísticas da *Energy International Agency* – EIA, observou-se que o setor industrial tem consumido muita energia em seus vários processos. A análise de cenários mostrou que as emissões de CO<sub>2</sub> industriais continuam a aumentar e que o grande consumo de energia da indústria e o vasto potencial de economia de energia tornam-se um objetivo atraente para melhorar a segurança energética e a mitigação climática por meio do

aumento da eficiência energética. O objetivo foi fornecer bases para a análise de políticas para melhorar a eficiência e conservação da energia na indústria, pesquisando mais de 300 políticas, abrangendo cerca de 570 medidas implementadas pelos governos nos países da AIE - Brasil, China, Índia, México, Rússia e África do Sul.

Dandres *et al.* (2012), com o estudo da "Macro de análise dos impactos econômicos e ambientais de uma política de bioenergia da União Europeia 2005-2025", basearam-se na metodologia de avaliação do ciclo de vida e incluíram elementos para modelar as externalidades econômicas e a evolução temporal dos parâmetros de fundo. O modelo de equilíbrio geral, ou *Global Trade Analysis Project* (GTAP), foi utilizado para simular as consequências econômicas das políticas em um quadro dinâmico que representa a evolução temporal dos parâmetros macroeconômicos e tecnológicos. O resultado revelou que tanto os impactos ambientais diretos quanto os indiretos contribuem substancialmente para o impacto ambiental global e que esses impactos indiretos podem variar significativamente entre períodos, setores econômicos e regiões.

Carlucci (2012) realizou sua pesquisa com objetivo de analisar o impacto das variáveis, o tamanho e a localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar no Brasil. A partir dos dados do anuário da cana-de-açúcar na safra de 2008/2009, foi aplicada a abordagem *bottom-up*, Análise Envoltória de Dados (DEA) para uma amostra de 355 usinas, classificadas por tamanho, localização e eficiência operacional. Elaborou-se uma análise em profundidade com um estudo de múltiplos casos em um grupo de usinas e posteriormente foi feita uma entrevista com especialistas do setor sucroalcooleiro. Concluiu-se que a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar depende do tamanho, na medida em que as usinas de maior porte tendem a investir mais em tecnologias que proporcionam um maior ganho de eficiência operacional. A eficiência também depende da variável localização, na medida em que o estado de São Paulo apresenta condições edafoclimáticas mais favoráveis à extração de uma cana-de-açúcar com maior teor de sacarose, que, consequentemente, pode influenciar na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar.

Färe *et al.* (2013) aplicaram um modelo baseado na estrutura de capacidade de *Leif Johansen*, que estima o efeito limitador de capacidade das saídas indesejáveis. O modelo assemelha-se ao que é referido como a Lei Von Liebig do Mínimo, familiar à literatura de economia agrícola. Foi aplicado ao modelo um conjunto de dados de nível firme da indústria sueca de papel e celulose. Esse modelo pode, portanto, ser usado como um instrumento para avaliar a regulação ambiental, por exemplo, classificando a restrição de diferentes tipos de resultados indesejáveis sujeitos a taxas de imposto diferentes. O resultado mostra geralmente que o CO<sub>2</sub> era a saída menos danosa para se causar à produção perdida da saída desejável,

devido à regulação. Do ponto de vista político, isso indica que havia um potencial para elevar o imposto de CO<sub>2</sub> sem infligir custos demais (em relação ao custo de regulamentar outros prejuízos) sobre as empresas.

Gonzalez-Salazar *et al.* (2014) propõem uma metodologia para estimativa do potencial energético de biomassa: projeções de potencial futuro na Colômbia, a fim de estimar o futuro potencial de energia de biomassa em países com mercados internos incapazes de influenciar os mercados internacionais. O modelo de previsão é um algoritmo de otimização baseado em cenários que maximizam o lucro anual da produção local e da importação de *commodities* em um país sujeito a certas restrições (mercado interno). Demanda, área limitada, bem como dados demográficos, macroeconômicos e de mercado (por exemplo, preços domésticos e internacionais de *commodities*) podem influenciar essa dinâmica. O potencial da bioenergia é direcionado pela demanda e pelo uso da terra em diferentes cenários globais selecionados da literatura. Pode ser vantajoso para os países em uma fase inicial do processo de avaliação do potencial futuro da bioenergia.

Gao e You (2015) pesquisaram o projeto sustentável e a operação de redes de cadeia de fornecimento de gás de xisto com otimização econômica e ambiental do ciclo de vida. Criaram o modelo de otimização multiobjetivo para o desenho e a operação sustentável de redes de cadeia de suprimento de bioeletricidade, que simultaneamente atenda aos impactos econômicos, ambientais e sociais associados. O modelo proposto cobre o ciclo de vida da bioeletricidade do início ao fim, incluindo o cultivo e colheita de biomassa, o pré-tratamento da matéria-prima, a conversão de energia, bem como o transporte e armazenamento e o fornecimento de bioeletricidade no estado de Illinois, nos Estados Unidos. Os objetivos considerados nesse trabalho são a minimização do custo nivelado da bioeletricidade, diminuindo o impacto ambiental da unidade e maximizando o total acumulado de empregos locais gerados pelo projeto da cadeia de suprimento de bioeletricidade. As características críticas capturadas pelo modelo incluem locais espacialmente explícitos, sazonalidade no suprimento de biomassa, degradação de recursos de biomassa, baixa densidade de transporte, conversão de biomassa para eletricidade de vários estágios, tecnologia de conversão diversa, incentivos governamentais, emissões de GEE, economia, dentre outras.

Fais (2015) desenvolveu técnicas de modelagem explícita para representar instrumentos de políticas e modelos de energias renováveis na Alemanha de forma endógena, para aplicar essa metodologia no escopo de uma análise comparativa do sistema energético alemão com o modelo nacional TIMES-D. Quando os países são associados por meio de um sistema de comércio de licenças de emissão, os instrumentos de política nacional, como o regime alemão de tarifas de alimentação, podem ter um impacto em todos os países

participantes. O apoio adicional à eletricidade renovável na Alemanha implica em uma diminuição dos preços dos certificados de emissão, sem incentivar a redução.

Adler e Volta (2016) propuseram a utilização de abordagens *top-down* atuais de modelagem de externalidades e seus respectivos pressupostos no âmbito *bottom-up* do DEA. A função de distância ambiental econômica direcional (DEED) é uma abordagem unificada, baseada em um programa linear que avalia a ineficiência relativa às unidades em exame, com respeito a uma tecnologia de referência única. Foi discutido o impacto dos pressupostos de descarte em profundidade e demonstrado como diferentes versões do modelo DEED melhoram os modelos apresentados na literatura até o momento. O DEED é particularmente relevante nos casos em que os poluentes têm um valor de mercado ou regulamentar e onde os custos podem ser aumentados, desde que a produção gere maiores lucros, por exemplo.

Segundo os estudos analisados, existem diversos modelos para avaliar as externalidades da produção de diferentes setores; há também várias metodologias e vasto referencial teórico sobre eficiência energética. Contudo, devido a mudanças ambientais e políticas, os requisitos em modelagem passam sempre por mudanças e as pesquisas sob as condições reais precisam ser exploradas. Desse modo, as ferramentas de modelagem existentes devem ser avaliadas em relação à sua adequação para a avaliação de um cenário delimitado.

Assim, os efeitos diversos das externalidades podem variar de acordo com a localização, com a distribuição das populações, dos recursos naturais envolvidos e do clima. Portanto, as externalidades de uma região ou país podem não ser transferíveis para outra região. Outro parâmetro importante na estimação de externalidades com base em estudos anteriores é o fato de que alguns estudos apenas incluem impactos regionais e locais e não consideram os impactos globais relacionados, por exemplo, ao aquecimento global.

Dessa forma, a metodologia selecionada para a primeira etapa do desenvolvimento desta tese é o modelo DEA, uma abordagem não paramétrica, que pode ser considerada *bottom-up*, aplicada em diversas áreas. Seiford (2005) compilou uma bibliografia de 2.800 artigos e trabalhos de pesquisa sobre o modelo DEA do período de 1978 a 2005. A bibliografia mostra que a DEA foi aplicada em várias indústrias de serviços, incluindo transportes (ferrovias e aeroportos), serviços públicos (água, eletricidade e telecomunicações), instituições de ensino superior e secundário, setor agrícola, setor sem fins lucrativos, bem como programas públicos e instituições financeiras (principalmente bancos). Um dos motivos do modelo DEA ter sido aplicada em várias áreas é a sua capacidade de lidar com múltiplas entradas e saídas. Para Bowlin (1998), a escolha dos *inputs* e *outputs* corretos é muito importante para a efetividade da interpretação, utilização e aceitação dos resultados da análise DEA pelos gestores e outras partes afetadas.



No Quadro 2, consta um resumo de alguns estudos que aplicaram o DEA para avaliar a eficiência em setores florestais e de celulose é mostrado. Para cada estudo, este quadro apresenta os autores, o tamanho da amostra, os inputs e outputs do modelo, bem como os resultados alcançados.

Quadro 2 - Estudos Aplicando o DEA para Avaliar a Eficiência em Setores Florestais, de Celulose.

Autores	Amostra	Inputs	Outputs	Resultados
Welch, E., e Barnum, D. (2009).	Usando os dados EIA 906 e Federal Energy Regulatory Commission (FERC 423), o artigo estima as compensações custo / carbono enfrentadas por dois conjuntos de usinas: aqueles que usam insumos de carvão e gás e aqueles que usam insumos de carvão, gás e petróleo.	Carvão, gás e Petróleo.	Total de eletricidade.	Demonstra que o DEA que pode ajudar a informar o debate de políticas públicas sobre como equilibrar os custos e benefícios do abatimento de carbono pelas empresas de eletricidade.
Da Silva Macedo, M. A., e de Almeida, K. (2009).	Agroindústria de papel e celulose.	Valor do Imobilizado e Número de Empregados.	Lucro Líquido ou EBITDA ou Riqueza Criada.	O estudo foi capaz de determinar o desempenho organizacional multicriterial, com base em indicadores contábil-financeiros.
Nascimento dos Santos, R. B. (2011).	Setor de Fabricação de Produtos de Base Florestal (SFPBF) de cada Estado.	Total de Custos das Operações Industriais (COI). Salários, Retiradas e Outras Remunerações.	Receita Líquida de Vendas.	Verificou-se que no Brasil o COI é a principal causa da ineficiência técnica.
J. Blomberg, E. Henriksson, R. Lundmark (2012).	Eficiência energética e política nas fábricas suecas de papel e celulose: uma abordagem do modelo DEA.	Valor em mão de obra, eletricidade e óleo.	Toneladas produzidas.	Esse artigo fornece evidências empíricas sobre o potencial de melhoria da eficiência da eletricidade na indústria sueca de celulose e papel usando técnicas de DEA
Dogan, N. O., e Tugcu, C. T. (2014).	Os países do G-20 e a sua eficiência na produção de eletricidade é medida em cinco diferentes períodos de tempo.	Fontes de carvão, fontes hidroelétricas, fontes de gás natural, fontes de petróleo e fontes de energia renováveis.	Eletricidade Gerada.	Apresentou que o G-20 tem experimentado uma transformação de estrutura monopolar para multipolar em termos de produção de energia eficiente.



Oliveira, R. A. D. (2016).	159 companhias pertencentes (57) e não pertencentes (102) à carteira teórica do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da BMEFBOVESPA.	Ativo circulante, ativo imobilizado e o custo dos produtos vendidos.	Lucro operacional.	Os resultados obtidos revelam que as companhias da carteira ISE apresentam eficiência operacional inferior às demais companhias. Concluiu-se que o fato dessas companhias serem consideradas como de conduta sustentável, isso necessariamente não se reflete em sua eficiência operacional.
TSAI, Wen-Hsien et al., (2016).	37 países europeus e 36 países asiáticos dos países-membro das Nações Unidas.	Força de trabalho, consumo de energia e gastos do governo.	Produto interno bruto (PIB) e emissões de CO2	Os autores concluíram que é essencial que os formuladores de políticas compreendam a relação entre a força de trabalho, o consumo de energia e os gastos do governo como insumos, o PIB como a produção desejável e as emissões de CO2 como resultado indesejável no processo de tomada de decisões.
Gavião <i>et al.</i> (2017).	Avaliação de medidas de eficiências de indicadores de sustentabilidade. (3 empresas do setor de papel e celulose no Brasil)	Quantidade de água utilizada no processo industrial e as emissões de CO2.	Receita Líquida	Através do modelo DEA, é possível desenvolver uma análise que demonstre o quanto as empresas têm se esforçado para melhorar seu desempenho no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável.

**Fonte:** elaborado pela autora (2017).

Deve-se enfatizar que o objetivo desta tese não é desenvolver o modelo ideal que responderá a todas as questões relacionadas à produção de bioeletricidade na indústria de celulose, mas utilizar um instrumento que subsidie a tomada de decisões entre o setor público e privado. A conceituação ajuda a identificar os métodos utilizados na pesquisa e consequentemente pode favorecer a implantação de políticas específicas para o setor avaliado.

Os modelos e sua aplicação estão sendo comparados aos seus resultados e a evolução técnica desde 1950, com os primeiros estudos empíricos do modelo DEA e estudos sobre externalidades. Assim, as aplicações do DEA aumentaram no campo da economia ambiental e energética, por exemplo nos estudos sobre eficiência energética de Nassiri e Singh (2009), Hu e Kao (2007), Yeh *et al.* (2010) e Song *et al.* (2013), Nesse sentido, vários modelos de DEA foram empregados em diferentes indústrias e setores.

Esta seção apresentou diferentes modelos selecionados, por meio da busca por escritores e palavras-chave aplicadas em duas bases de dados online (*Web of Science e Scopus*) entre 1995 e 2017 para identificar artigos elegíveis para esta pesquisa. Os artigos selecionados foram, então, classificados e revisados com base em autores, esquema de aplicação, modelos DEA, campos de aplicação, número de publicações, distribuição de periódicos e ano de publicação.

A modelagem pode levar a resultados diferentes dependendo das escolhas feitas. A forma como é abordada a metodologia define a orientação do modelo, ou seja, sua orientação: *bottom-up* ou *top-down*, entrada (*input*) ou orientação à saída (*output*). Como resultado do método, as escolhas das variáveis e as limitações do modelo devem ser claramente indicadas no estudo a fim de obter o melhor resultado.

Pode se concluir que os efeitos diversos das escolhas das variáveis podem variar de acordo com a localização, com a utilização dos recursos naturais, com as variáveis econômicas e, especificamente, com a disponibilidade de informações do setor avaliado. Assim, o modelo DEA foi escolhido para incluir efeitos específicos da indústria de celulose na produção de bioeletricidade, bem como níveis de eficiência dessa produção e, finalmente, para identificar as externalidades que influenciam o comportamento dessa eficiência.

## 4. METODOLOGIA E APLICAÇÕES

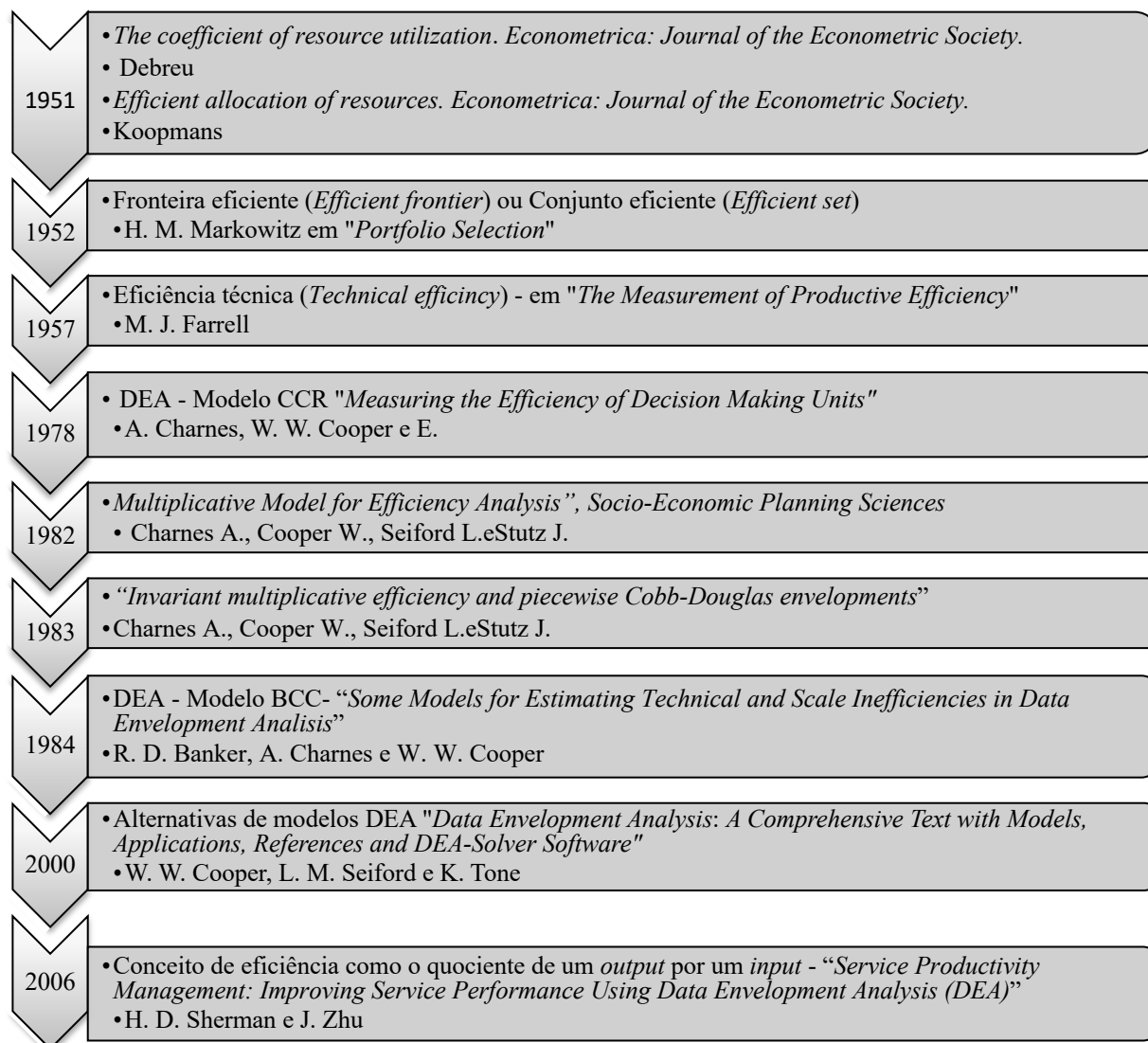
Este capítulo define a abordagem metodológica em que se baseia esta tese, caracteriza o tipo de pesquisa realizada, os métodos utilizados para o alcance dos objetivos propostos e realiza as considerações a respeito do tratamento dos dados. O método aplicado foi a (DEA) para mensurar a eficiência na produção de bioeletricidade nas indústrias de celulose com potência instalada acima de 100 MW. Ela pode ser dividida em etapas: a) identificação das variáveis para produção de bioeletricidade nas indústrias de celulose produtoras de energia subsidiadas pela *survey* auto-administrada; b) seleção de variáveis e mensuração da eficiência das indústrias de celulose para a produção de bioeletricidade; c) análise pós-eficiência para identificar as externalidades que influenciam a eficiência das indústrias produtoras de bioeletricidade e, finalmente, d) análise dos resultados.

### 4.1 DEA - *Data Envelopment Analysis*

A abordagem conceitual sobre a Análise Envoltória de Dados (DEA – *Data Envelopment Analysis*) inicia-se mostrando a evolução histórica dos trabalhos que marcaram a evolução do método DEA. Posteriormente, é apresentada uma breve introdução sobre o conceito de eficiência e produtividade e, finalmente, faz-se uma discussão das aplicabilidades, das vantagens e desvantagens dessa técnica.

O método DEA apresentou constante evolução desde seu desenvolvimento e segue sendo testado e aprimorado continuamente, como ilustrado na Figura 7. Em recente estudo, Emrouznejad e Yang (2018) apresentaram uma extensa lista de artigos relacionados ao modelo DEA, incluindo desenvolvimentos teóricos e metodológicos, aplicações em cenários reais e diversificados de 1978 até o final de 2016. Os autores concluíram que a aplicação do método cresceu exponencialmente tanto como uma ferramenta para o uso no setor público quanto para o uso no setor privado como instrumento para a tomada de decisões. Isso causa uma complexidade na escolha da melhor modelo DEA a se utilizar. Essa dificuldade persiste, apesar das muitas compilações existentes apresentadas tanto na literatura nacional, como a obra de Lins e Angulo Meza (2000), quanto na esfera internacional, como o livro de Cooper *et al.* (2000), bem como os artigos de Seiford (1996) e Cook *and* Seiford (2009).

Figura 7 - Evolução Histórica dos Trabalhos que Marcaram a Evolução do Modelo DEA.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

A discussão histórica na literatura econômica para medir produtividade e eficiência começou com os estudos de Debreu (1951) e Koopmans (1951), que foram os primeiros a combinar tecnicamente os insumos com as saídas de produção e a introduzir a abordagem da função de distância para estimar as diferenças entre os níveis de saída reais em relação ao máximo nível de saída potencial.

Outro trabalho significativo foi desenvolvido por Markowitz (1959), que teve início com sua tese de doutorado e finalizado com seu livro, em 1959, "*Portfolio selection: efficient diversification of investments*". O objetivo dos seus estudos era resolver qual a forma de calcular conjuntos eficientes para um grande número de títulos e como incorporar a análise de variância média em uma teoria do comportamento racional sob incerteza. Porém, a medição

de eficiência padrão foi iniciada por Farrell (1957), que propôs medir a eficiência de uma unidade produtiva em termos dos desvios realizados de uma fronteira de produção idealizada.

Farrell (1957) ampliou esse trabalho na tentativa de operacionalizar a medida de produtividade e eficiência. O autor entende que a produtividade é a quantidade gerada de um produto desejado (*output*) pela quantidade consumida de um determinado insumo alocado (*input*) a um sistema de produção. Entretanto, para determinar a medida de eficiência de uma unidade produtiva é necessário comparar sua relação ao melhor nível real de eficiência observado. O que significa que a medida da eficiência deve ser o resultado da comparação de dados reais das unidades de negócios em análise que utilizam os mesmos insumos e produtos e que praticam tarefas semelhantes.

Coelli *et al.* (2005) definiu a produtividade de uma empresa como a proporção das saídas que ela produz a partir das entradas utilizadas. Dessa forma, os autores concluem que uma empresa pode ser tecnicamente eficiente, mas ainda pode melhorar a sua produtividade, aproveitando as economias de escala. A produtividade refere-se, muitas vezes, à produtividade total dos fatores, ou seja, é uma medida envolvendo todos os fatores de produção. Portanto, quanto maior for a relação entre a quantidade produzida e os fatores utilizados, maior será a produtividade.

Segundo Farrel (1957), a eficiência pode ser decomposta em dois componentes: eficiência técnica, que reflete a habilidade da firma em obter o máximo de produto, dado um conjunto de insumos. Segundo Eficiência alocativa, que se relaciona com a capacidade da empresa em utilizar seus insumos em proporções ótimas, dados seus preços relativos.

Ghobadian e Husband (1990) atribuíram categorias à produtividade: a primeira enfoca o conceito econômico, ou seja, está relacionada à eficiência na alocação dos insumos. A segunda engloba os fatores tecnológicos, que diz respeito à relação entre a fração utilizada de *inputs* e *outputs* na produção de acordo com a tecnologia empregada e o conceito de engenharia, que analisa a relação entre o efetivo e o potencial *output* em um processo.

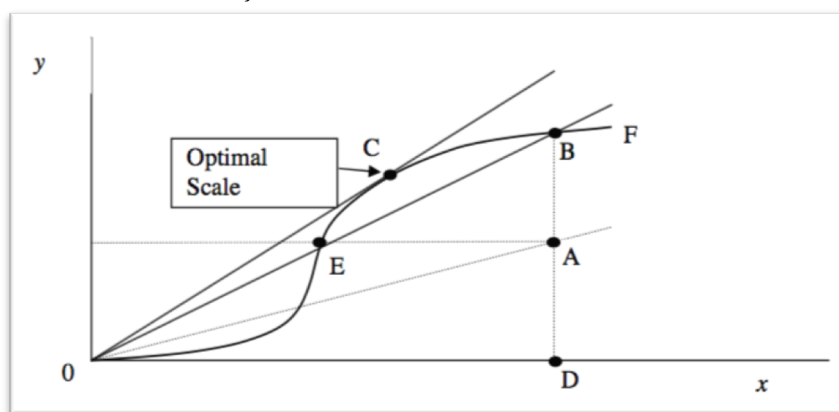
Apesar dos termos eficiência e produtividade algumas vezes serem usados de forma equivalente, na verdade eles não são exatamente idênticos. A eficiência refere-se à alocação ótima dos recursos e à ausência de desperdícios, ou seja, a capacidade que uma firma possui de utilizar os recursos (insumos) obtendo maior volume de produto final (PINDYCK e RUBINFELD, 2005). Por outro lado, produtividade é definida como a relação entre os produtos e os insumos necessários, razão entre *output* produzido e *input* disponível a um nível ótimo (COELLI, *et al.*, 2005).

Para Kumbhakar e Lovell (2003), a eficiência produtiva representa o grau de sucesso que os produtores obtêm na alocação dos insumos à sua disposição e os resultados que

produzem, em um esforço para atingir objetivos específicos de produção. Assim, para medir a eficiência produtiva, é necessário especificar os objetivos dos produtores e depois quantificar seus graus de sucesso.

No sentido de ilustrar a diferença entre eficiência e produtividade, é necessário entender o conceito de fronteira (ou curva) de produção construído em um sistema de coordenadas que representa o melhor desempenho de produção. Coelli *et al.* (2005) exemplifica um processo de produção simples no qual uma única entrada ( $x$ ) é usada para produzir uma única saída ( $y$ ). Os pontos A, B e C são exemplos de três produtores diferentes. A produtividade do ponto A pode ser medida pela razão  $DA/OD$  de acordo com a definição de produtividade, onde o eixo  $x$  representa entradas e o eixo  $y$  indica saídas. A Figura 8 apresenta essa dinâmica.

Figura 8 - Fronteira de Produção, Eficiência Técnica, Economia de Escala e Produtividade.



Fonte: Coelli et al. (2005), p. 5.

Na Figura 8,  $x$  é o raio da origem, que mede a produtividade em um ponto de dados específico. A inclinação desse raio é  $y/x$  e fornece uma medida de produtividade. Se a empresa que operava no ponto A passar para o ponto B, será tecnicamente eficiente (inclinação do raio maior). No entanto, ao se mover para o ponto C, o raio da origem estará em um tangente à fronteira de produção (produtividade máxima possível). O ponto C está na escala tecnicamente ideal. Portanto, a operação em qualquer outro ponto da fronteira da produção resulta em menor produtividade. O novo nível de produtividade é dado por  $BD/OD$ . Sendo assim, a produtividade pode ser representada, portanto, pela inclinação do raio por meio da origem que une o ponto específico em estudo. A eficiência do ponto A, por outro lado, pode ser medida pela proporção da produtividade do ponto A para do ponto B, isso é,  $AD/OD/BD/OD$ .

Essa eficiência é denominada como Eficiência Técnica (ET), podendo ser orientada para saída e entrada, ou seja, o produtor pode melhorar a saída com a mesma entrada (orientada para saída, ponto A a B) ou reduzir a entrada com a mesma saída (orientado a entrada, ponto A a E), melhorando sua tecnologia. Todos os pontos na fronteira de produção são tecnicamente

eficientes, enquanto que todos os pontos abaixo ou a uma distância direta da fronteira eficiente são tecnicamente ineficientes (WANG *et al.*, 2002).

Na literatura foram evidenciados inúmeros fatores que influenciam a eficiência produtiva e o crescimento da produtividade. Para Caves, Christensen e Diewert (1982), as unidades de tomada de decisão não são unidades produtoras homogêneas e, portanto, nem todas as unidades estão operando no mesmo nível de eficiência. Fagerberg (1994) e Consoli (2008) atribuíram a ênfase às fontes e aos efeitos da mudança tecnológica, uma vez que capacidade inovadora é um dos principais fatores que determinam o nível de produção e afeta o uso de insumos envolvidos no processo de produção. Além disso, outros trabalhos destacam a interação entre as empresas e o meio ambiente, incluindo outras empresas e os principais intervenientes institucionais (MALERBA e ORSENIGO, 1996; ANTONELLI, 2014).

No entanto, alguns fatores que influenciam a eficiência não estão sob controle direto do produtor no curto prazo, por exemplo: as características de localização do produtor; restrições de gestão; adoção lenta de mudanças no ambiente de mercado; desenvolvimento tecnológico; informações assimétricas no mercado de trabalho; aspectos sociais; condições geográficas ou climáticas; restrições regulatórias e institucionais; e regimentos governamentais. Por outro lado, referem-se a características que podem ser influenciadas pelo produtor no curto prazo: o tamanho do produtor, a intensidade de P&D e o grau de terceirização (COELLI *et al.*, 2005; STEPHAN *et al.*, 2008). Assim, as medidas de eficiência facilitam as comparações entre unidades de produção similares (LOVELL, 1996).

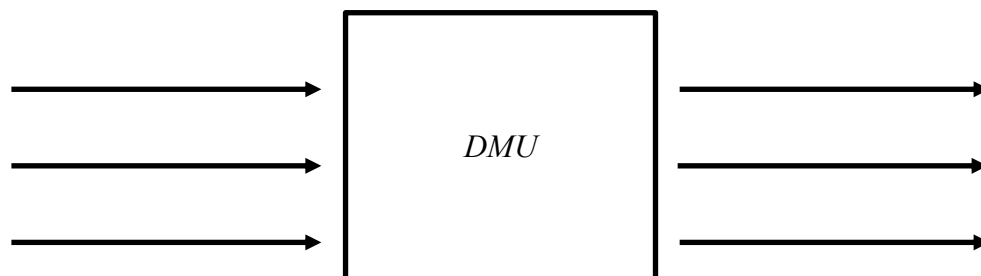
Conforme descrito em Coelli *et al.* (2005), a abordagem proposta por Farrell (1957), Shephard (1970) e Afriat (1972) sugeriu métodos de programação matemática que poderiam alcançar estimativas de fronteira. Em 1978, Charnes, Cooper e Rhodes (1978) - (CCR) desenvolveram um modelo que teve uma orientação de entrada e assumia retornos constantes à escala, *constant returns to scale* (CRS).

Em 1984, Banker, Charnes e Cooper (1984) (BCC) propuseram um modelo de retornos variáveis à escala, *variable returns to scale* (VRS), para determinar a eficiência das unidades que operam sob retornos variáveis à escala e introduziram a noção e a medida de eficiência de escala. Segundo Rosano-Penã *et al.* (2012), quando não se assume proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*, a única diferença entre os modelos CCR e BCC é o fator escala, que foi desenvolvido no modelo BCC.

Para Wang *et al.* (2002), o DEA pode ser definido como um método *bottom-up*, ou não paramétrico, para medir a eficiência de uma unidade de tomada de decisão (DMU - *Decision Making Unit*) com múltiplos *inputs* e/ou múltiplos *outputs*, conforme apresentado na Figura 9. O DEA importa-se com a eficiência da unidade individual, que pode ser definida

como a DMU, responsável por controlar o processo de produção e tomar decisões em vários níveis, incluindo operação diária, táticas de curto prazo e estratégia de longo prazo (CHARNES *et al.*, 1978).

Figura 9 - Unidade de Tomada de Decisão.



Fonte: Elaborado pela autora baseado em Coelli *et al.* (2005).

O DEA é usado para medir a produtividade relativa de uma DMU comparando-a com outras unidades homogêneas, transformando o mesmo grupo de entradas positivas mensuráveis nos mesmos tipos de saídas positivas mensuráveis. A abordagem não paramétrica depende de uma fronteira de produção definida como planos de produção ótimos (SIMAR e WILSON, 2007). Segundo Kassai (2002), a fronteira de eficiência (ou de máxima produtividade), considera a relação ótima insumo/produto e identifica as unidades que obtiveram a alocação ótima entre *inputs* e *outputs*.

Nesse caso, conforme apresentado, a orientação do modelo é que indica como uma DMU irá atingir a fronteira de eficiência. É possível orientá-lo de três formas: orientação aos *inputs*, orientação aos *outputs* ou orientação mista (*inputs/outputs*). Se um modelo é orientado aos *inputs*, significa que as DMUs tentarão atingir a fronteira realizando uma diminuição de seus recursos, sem que seus resultados sejam alterados. Se um modelo é orientado ao *output*, as DMUs tentarão atingir a fronteira maximizando seus resultados, mantendo constantes seus recursos disponíveis (CHARNES *et al.*, 1994). Se a orientação é mista, trabalham ao mesmo tempo na redução de *inputs* e no aumento de *outputs*; os modelos com orientação mista são conhecidos como modelos Aditivos, propostos em Charnes *et al.* (1985), e multiplicativos, propostos em Charnes *et al.* (1982).

A orientação de uma DMU (minimização de *inputs* ou maximização de *outputs*) é definida se a DMU em análise pode controlar seus *inputs* ou *outputs*. Por exemplo, Seiford e Zhu (1999) aplicaram o modelo orientado à entrada (*inputs*) para avaliar a eficiência em sistemas bancários, ou seja, os bancos mais eficientes seriam aqueles que conseguissem minimizar suas entradas e manter suas saídas. Por outro lado, Portela, Camacho e Borges (2012) utilizaram um modelo orientado à saída (*output*) para o sistema educacional português, ou seja,



os sistemas educativos mais eficientes seriam aqueles que conseguissem maximizar suas saídas (outputs) com a mesma quantidade de entradas.

Para cada DMU é possível determinar os níveis de consumo de *inputs* e de *outputs* por meio de um índice para avaliar a eficiência relativa. O índice varia entre 0 e 1 (equivalente a 0 e 100%), sendo que as unidades eficientes têm índice de valor igual a 1 (equivalente a 100%). Contudo, ter um índice de eficiência igual a 1 não corresponde, necessariamente, a uma DMU eficiente em termos absolutos, mas apenas mais eficiente que as outras DMU incluídas na amostra.

As funções de distância *outputs* caracterizam uma tecnologia de produção, observando a expansão proporcional máxima das saídas, dado o vetor de entrada. Uma função de distância de *inputs* caracteriza a tecnologia de produção, observando uma contração proporcional mínima do vetor de entrada, dado um vetor de saída. Uma função de distância de saída considera uma expansão proporcional máxima do vetor de saída, dado um vetor de entrada (Coelli *et al.*, 2005).

Para Cooper, Seiford e Zhu (2004), a escolha da orientação dos modelos (*inputs* /*outputs*), está relacionada a capacidade dos gestores em influenciarem a redução dos *inputs* gastos ou a maximização dos *outputs* gerados, respetivamente. O modelo CCR orientado ao *input* procura minimizar o consumo dos recursos de forma a gerar um determinado nível de produção, pelo que a eficiência é alcançada com a redução de *inputs*.

Para uma unidade *o* qualquer (de um grupo de *N* organizações homogêneas) que produz o vetor  $y_{ro}$ , utilizando o vetor insumo  $x_{io}$  caracteriza-se como uma tecnologia e retornos de escalas constantes (CRS). Sua solução envolve a obtenção dos valores  $v_i$  e  $u_r$  (o peso específico ou importância relativa de cada insumo *i* e produto *r*), maximizadores da eficiência da unidade *o* ( $H_o$ ), definida como o quociente entre a soma ponderada de *outputs* e a soma ponderada de *inputs*, sujeito a que nenhuma unidade tenha um índice maior que um, usando os mesmos pesos. A restrição implícita no modelo permite a total flexibilidade das ponderações imputadas aos *inputs* e *outputs* e, assim, capta como as unidades avaliadas combinam os produtos e insumos diferentemente, o que deve ser levado em consideração na hora de avaliar suas ineficiências. Dessa forma, a unidade avaliada também será comparada com o conjunto de unidades eficientes que têm o mesmo perfil tecnológico (ALBUQUERQUE *et al.*, 2012). A Tabela 6 apresenta as equações dos modelos iniciais do DEA, desenvolvido por Charnes *et al.* (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984).

Tabela 6 - Equações dos Modelos do DEA- CCR. Desenvolvido por Charnes *et al.* (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984).

<b>CCR DEA - OI Orientação ao <i>Input</i></b>	
$Max H_o = \left[ \sum_{r=1}^m u_r y_{ro} \right] \div \left[ \sum_{i=1}^n v_i x_{io} \right]$	
$s. a. \left[ \sum_{r=1}^m u_r y_{rj} \right] \div \left[ \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \right] \leq 1; u_r, v_i \geq 0; j = 1, \dots, N; r = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n$	(1)
<p>Os parâmetros utilizados no modelo 1 são:</p> <p>Para uma unidade <i>o</i> qualquer (de um grupo de N organizações homogêneas) que produz o vetor <math>y_{ro}</math>, utilizando o vetor insumo <math>x_{io}</math> e uma tecnologia com retorno constante de escala. A solução envolve a obtenção dos valores <math>v_i</math> e <math>u_r</math> (o peso específico ou importância relativa de cada insumo <i>i</i> e produto <i>r</i>) maximizadores da eficiência da unidade <i>o</i> (<math>H_o</math>), definida como o quociente entre a soma ponderada de <i>outputs</i> e a soma ponderada de <i>inputs</i>, sujeito a que nenhuma unidade tenha um índice maior que um, usando os mesmos pesos.</p> <p>A Equação (1) é transformada em um problema de programação linear (PPL) para evitar infinitas soluções, podendo ser condicionada a que <math>u_r</math> e <math>v_i \geq \varepsilon</math> (em que <math>\varepsilon=10^{-6}</math>) para impedir que os pesos obtenham o valor zero. Ou seja, para evitar que algum produto ou insumo seja marginalizado da determinação da eficiência.</p>	
$Max H_o = \sum_{r=1}^m u_r y_{ro}.$	
$S. a. \sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1; \sum_{r=1}^m u_r y_{rj} \leq \sum_{i=1}^n v_i x_{ij}; \quad u_r, v_i \geq \varepsilon;$	(2)
<p>A nova Equação PPL CCR-OI é dada por (2). O modelo CCR orientado para <i>inputs</i> procura minimizar o consumo dos recursos de forma a gerar um determinado nível de produção, pelo que a eficiência é alcançada com a redução de <i>inputs</i>.</p>	
<b>CCR DEA - OO Orientação ao <i>Output</i></b>	
$Min \phi_o = \sum_{r=1}^m v_i x_{io}.$	
$S. a. \sum_{i=1}^n u_r y_{ro} = 1; \sum_{r=1}^m u_r y_{rj} \geq \sum_{i=1}^n v_i x_{ij}; \quad u_r, v_i \geq \varepsilon.$	(3)
<p>Esses modelos devem dar resultados equivalentes. Apenas as eficientes com <math>H=1</math> em (2) alcançarão em (3), <math>\phi=1</math>. As ineficientes apresentarão <math>\phi&gt;1</math>, que terá um valor inverso ao modelo (2) (<math>\phi=1/H</math>).</p>	

Fonte: elaborada pela autora a partir de Albuquerque *et al.* (2012).

Tabela 7 - Equações dos Modelos do DEA- BCC. Desenvolvido por Charnes et al. (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984).

<b>BCC-DEA - OI Orientação ao <i>Input</i></b>	
$\text{Min } B_o = \sum_{i=1}^n v_i x_{io} + k. \quad \text{S. a: } \sum_{r=1}^m u_r y_{ro} = 1; \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} + k - \sum_{r=1}^m u_r y_{rj} \geq 0;$ $u_r, v_i \geq 0; k - \text{irrestrito}; i = 1, \dots, m; r = 1 \dots n; j = 1, \dots, N \quad (4)$	
<p>O modelo BCC, com a introdução do fator de escala, permite isolar a parte da ineficiência produtiva que se deve à ineficiência técnica no sentido estrito (ET), eliminando o componente devido a um porte de produção inadequado. O modelo BCC é então uma generalização do modelo CCR que possibilita que as DMUs que utilizam baixos níveis de <i>inputs</i> obtenham retornos crescentes de escala, e as que utilizam elevados níveis de <i>inputs</i> obtenham retornos decrescente de escala (Cooper <i>et al.</i>, 2007).</p>	
<b>BCC-DEA - OO Orientação para <i>Output</i></b>	
$\text{Max } w_o = \sum_{r=1}^m u_r y_{ro} + k. \quad \text{S. a: } \sum_{i=1}^n v_i x_{io} = 1; \sum_{r=1}^m u_r y_{rj} + k - \sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq 0;$ $u_r, v_i \geq 0; \quad k - \text{irrestrito}. \quad r = 1, \dots, m.; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, N. \quad (5)$	
<p>Um valor positivo de <math>v_i</math> indica um retorno decrescente de escala; um valor negativo de <math>v_i</math> indica um retorno crescente de escala e um valor de <math>v_i</math> igual a zero indica um retorno constante de escala.</p>	

**Fonte:** elaborada pela autora a partir de Albuquerque *et al.* (2012).

Segundo Cooper *et al.* (2007), a eficiência calculada por meio do modelo CCR é a eficiência técnica global. Assim, se uma DMU é eficiente por meio do modelo CCR, então é globalmente eficiente (*globally efficiently*) e está operando na produtividade máxima. Enquanto se a eficiência é calculada por meio do modelo BCC é uma eficiência técnica local. Assim, uma DMU eficiente por meio do modelo BCC, então é localmente eficiente (*locally efficiently*). Portanto, a diferença entre esses dois modelos é que o CCR calcula a eficiência total e o BCC calcula a eficiência técnica. A eficiência total compara uma DMU com todas as concorrentes do grupo estudado, enquanto a eficiência técnica compara uma DMU apenas com aquelas que operam em escala semelhante

A eficiência calculada pelos modelos CCR e BCC revela a condição de retornos de escala. Retornos de escala crescente significam que a DMU em análise está operando em nível inferior à escala ótima, existindo espaço para a expansão de sua produtividade. Retornos decrescentes de escala significam que a DMU em questão opera acima do seu nível ótimo de produção, diminuindo sua produtividade. Já retornos constantes de escala significam que a DMU em estudo está operando no seu nível ótimo de escala, devendo manter esse nível de produção. Assim, grandes empresas ou países muito desenvolvidos, por exemplo, tendem a

apresentar retornos decrescentes de escala, enquanto que pequenas empresas ou países com baixo nível de desenvolvimento tendem a apresentar retornos crescentes de escala.

Além desses dois modelos clássicos, foram desenvolvidos vários modelos DEA que, simultaneamente, estimam possíveis reduções de *inputs* e expansões de *outputs*, com base no modelo BCC. Charnes *et al.* (1985) construíram o modelo aditivo invariante de tradução (entrada e saída). O modelo foi então prolongado por Tone (2001) no modelo de medida com base em folgas SBM (*Slacks-Based Measure*), com medida de invisibilidade monótona e unitária. Outro modelo não orientado que transforma dados usando uma estrutura logarítmica é o modelo multiplicativo, desenvolvido por Charnes, Cooper, Seiford e Stutz (1982).

Cook e Zhu (2007) desenvolveram um modelo de DEA de padrões CRS para lidar com fatores de função dupla (flexíveis), tanto para um caso DMU individual como também para a avaliação de eficiência agregada da coleção de DMUs. Do ponto de vista da gestão, os alvos de eficiência são elementos de conhecimento valiosos, que podem ser utilizados como *benchmarks* para métodos corretivos e melhorias das atividades operacionais (ANDERSON *et al.*, 2004; COELLI *et al.*, 2005).

No entanto, avaliar a eficiência por meio do modelo DEA tradicional de maximizar saídas ou minimizar entradas não é adequado para medir reduções de subprodutos indesejáveis, pois estes precisam ser tratados de maneira especial ao expandir o modelo DEA tradicional. Fare *et al.* (1993) propõem o primeiro modelo de DEA estendido para avaliar a eficiência ambiental, considerando resultados indesejáveis com descartabilidade e considerando estudos de campo de energia. Utilizando modelos DEA indesejáveis; eles designam DMUs com múltiplas entradas e saídas com referência aos estudos de Fare *et al.* (1993).

## 4.2 Índice Composto

Uma questão que se levanta ao utilizar o DEA segundo Meza e Lins (2002) é a falta de discriminação entre as DMUs, ou seja, quando muitas DMUs são consideradas eficientes. Nesse caso, são propostos métodos de desempate de eficiência. Assim, alguns métodos de desempate foram propostos para complementar o resultado. Pode-se citar alguns pesquisadores como: Seiford e Zhu (1999), Boussofiane *et al.* (1991), Entani, *et al.* (2002), Adler *et al.* (2002), Meza e Lins (2002), Leta *et al.* (2005), Angulo-Meza *et al.* (2005), Soares de Mello *et al.* (2008b) e Da Silveira *et al.* (2012), que utilizaram a complementação como forma de promover o desempate nos modelos DEA, principalmente quando o número de DMUs fosse considerado baixo.

Devido à existência de incerteza, a DEA às vezes enfrenta situações de dados

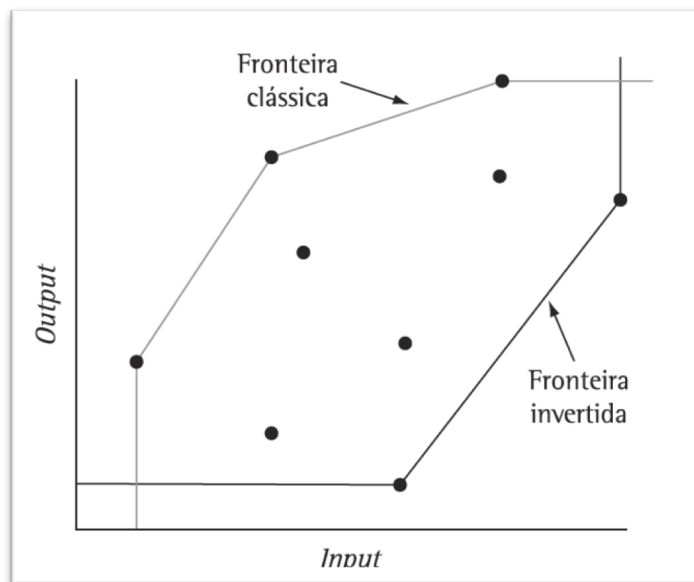
imprecisos, especialmente quando um conjunto de DMUs contém dados ausentes, ordinais, difusos ou de intervalo. Assim, na presente pesquisa, optou-se por utilizar o método de desempate por Índice Composto/DEA, proposto por Leta *et al.* (2005), que consiste em obter a média ponderada e normalizada, por meio do valor máximo, das eficiências padrão e invertida, a partir do cálculo do índice, conforme a Eq. 6:

$$IC_k = \frac{[Eficiência_k + (1 - Eficiência_k^{invertida})]/2}{\max \{[Eficiência_k + (1 - Eficiência_k^{invertida})]/2\}} \quad k=1,2,3,\dots \quad (6)$$

Onde:  $Eficiência_k$  é a eficiência da DMU k;  $Eficiência_k^{invertida}$  é a eficiência invertida da DMU k;  $IC_k$  é o índice composto das eficiências normalizado.

De acordo com Mariano e Rebelatto (2014), o Índice Composto é baseado no conceito de fronteira invertida, ou seja, na substituição de *inputs* por *outputs* em um modelo DEA, solucionando-se o problema linear, conforme descrito na Figura 10.

Figura 10- Fronteira de Eficiência DEA BCC Clássica e Fronteira de Eficiência Invertida.



Fonte: Da Silveira, Meza e Mello (2012).

Leta *et al.* (2005) define que a fronteira de eficiência invertida é uma avaliação pessimista das DMUs, formadas por aquelas que assumiram os menores escores de eficiência. Além disso, os autores afirmam que DMUs situadas na fronteira invertida possuem as melhores práticas sob uma ótica oposta. Esse método avalia a ineficiência de uma DMU, construindo uma fronteira constituída pelas unidades com as piores práticas gerenciais, chamada de fronteira

ineficiente. As projeções das DMUs na fronteira invertida indicam uma anti eficiência, que é a combinação linear de anti-*benchmarks*.

Segundo Gomes *et al.* (2012), o uso da fronteira invertida justifica-se por ser um método de discriminação crescente que não necessita de julgamentos de valor para os tomadores de decisão, o que reduz a subjetividade, sendo, dentre os métodos existentes, considerado o mais fácil. Portanto, a fronteira invertida também será utilizada para identificar as indústrias de celulose com as piores práticas. Dessa forma, a DMU mais eficiente apresentará uma boa performance em seus pontos fortes, analisada no cálculo da fronteira de eficiência clássica, e um desempenho não ruim em seus pontos fracos, constatado no cálculo da fronteira de eficiência invertida, subtraindo-se o valor 1.

### 4.3 Etapas para aplicação do Método DEA

Para aplicação do DEA, é necessário seguir algumas etapas para a execução e a escolha do modelo mais adequado. A primeira etapa é definição das DMUs, que devem possuir mesmos produtos e insumos, variando apenas a intensidade. Além disso, as DMUs devem ser homogêneas, ou seja, devem executar as mesmas tarefas. A segunda etapa é a seleção das variáveis que devem ser escolhidas dentro de um conjunto de variáveis ligadas ao modelo, permitindo o conhecimento sobre as unidades a serem avaliadas. E finalmente, escolhe-se o modelo mais apropriado, ou seja, aquele que se adeque ao objeto de estudo a fim de correlacionar as externalidades às indústrias eficientes avaliadas.

#### 4.3.1 Levantamento Inicial

Para avaliar a eficiência das indústrias de celulose que geram bioeletricidade como alternativa energética sustentável, foi necessário levantar informações prévias dos principais fatores que afetam esse setor. Um dos grandes problemas quando se procura trabalhar com temas específicos que envolvem empresas privadas é a dificuldade de acesso a dados e informações.

Uma vez que não há no país um órgão que efetue a coleta e controle dos dados de maneira unificada e padronizada. Existem organizações privadas que detêm informações, mas utilizam-as de forma comercial, publicando apenas dados parciais. Assim, a coleta de dados sobre o setor de celulose é restrita.

Desta forma, as variáveis utilizadas no Modelo DEA foram escolhidas após aplicação da *survey* autoadministrada. A *survey* foi um importante instrumento para a seleção

das variáveis que estavam disponíveis nos relatórios de sustentabilidade, relatório de manejo florestal e no relatorório de planejamento energético da ANEEL.

#### 4.3.2 *Decision Making Units (DMU)*

Segundo os dados levantados neste estudo, o segmento de celulose apresenta alto grau de concentração: apenas cinco indústrias representam juntas quase 80% da capacidade instalada total do país, são elas: Eldorado Brasil, Fibria, Veracel, Aracruz e Celulose Riograndense. Os dados das empresas geralmente englobam todas as unidades industriais que estão distribuídas em diferentes regiões geográficas. A indústria de celulose está inserida em uma cadeia produção longa e integrada, que começa nas áreas florestais com a colheita de árvores e termina, neste estudo, com a produção de celulose e bioeletricidade.

As escolhas das amostras de DMUs são baseadas nos pré-requisitos do DEA. De acordo com Emrouznejad (2005), essa técnica permite a comparação entre unidades produtivas que empregam múltiplas entradas (insumos) e múltiplas saídas (produtos). As unidades produtivas comparadas entre si devem ser homogêneas e pertencentes ao mesmo segmento de atividade. Banker *et al.* (1984) assumem que as DMUs avaliadas são homogêneas, o que significa que realizam as mesmas operações consumindo os mesmos *inputs* para produzir os mesmos *outputs*. Nesse sentido, Cooper e Schindler (2003) acreditam que a seleção de algumas observações pode responder por toda uma população. Dessa forma, o processo de seleção de observações das variáveis deve ser feito por meio de critérios rigorosos.

Neste estudo, as empresas selecionadas estão em diferentes localidades do país, distribuídas pelas cidades de Belo Oriente/MG, Camaçari/BA, Eunápolis/BA, Três Lagoas/MS, Aracruz/ES, Mucuri/BA, Guaíba/RS e Imperatriz/MA. Todas as indústrias foram selecionadas por uma restrição de estratificação, segundo a qual deveriam ser empresas produtoras de bioeletricidade classificadas pelas ANEEL (Autoprodução de Energia APE<sup>9</sup> e Produtor Independente de Energia PIE<sup>10</sup>), possuir potência instalada superior a 100.000,00 Watts, bem como ter relatórios de sustentabilidades e plano de manejo florestal disponibilizados para consulta. As indústrias selecionadas para análise foram a princípio 11 DMUs, no entanto, pela ausência de dados, duas DMUs foram excluídas (município de Telêmaco Borba/PR. e de Ortigueira/PR.), embora estivessem classificadas pela potência outorgada (113.250 KW e 330.000 KW, respectivamente). As DMUs foram denominadas como U01, U02, U03, ..., U9.

9 APE- autoconsumir comercializar excedentes (Leis no 9.427/96 e no 9.648/98)

10 PIE -, comercializar, no todo ou em parte (autoconsumir a parte não comercializada) (Lei no 9.074/95)

Na Tabela 8 são apresentadas as unidades de tomada de decisão (DMUs) consideradas neste trabalho.

Tabela 8: Unidades de Tomada de Decisão (DMUs).

CEG/ANEEL	Usinas	Município	Estado	Destino da Energia	Potência Outorgada (kW)	Fonte
UTE.FL.MG.027941-2.01	U1	Belo Oriente	MG	APE	100000	Licor Negro
UTE.FL.BA.000182-1.01	U2	Camaçari	BA	PIE	108600	Licor Negro
UTE.FL.BA.029014-9.01	U3	Eunápolis	BA	APE	126600	Licor Negro
UTE.FL.MS.029694-5.01	U4	Três Lagoas	MS	PIE	444680	Licor Negro
UTE.FL.ES.000127-9.01	U5	Aracruz	ES	APE	210400	Licor Negro
UTE.FL.BA.000187-2.01	U6	Mucuri	BA	APE	214080	Licor Negro
UTE.FL.MS.030583-9.01	U7	Três Lagoas	MS	APE	226000	Licor Negro
UTE.FL.RS.030666-5.01	U8	Guaíba - RS	RS	APE	250994	Licor Negro
UTE.FL.MA.030959-1.01	U9	Imperatriz - MA	MA	APE	254840	Licor Negro

**Fonte:** Elaborada pela autora com base dados ANEEL (2016).

As definições das legendas são as utilizadas pela ANEEL. O Código Único de Empreendimentos de Geração (CEG), foi criado para identificar única e inequivocamente o empreendimento de geração de energia elétrica e, uma vez criado, o acompanhará, independente de alteração de atributos ou proprietários da usina (ANEEL, 2016). Nele está descrito o tipo de geração, a fonte de energia, a unidade federativa, o núcleo e o dígito (que nunca mudará, pois é o sequencial numérico com dígito verificador - D) e a versão (indica se houve alteração no Tipo de Geração, na Fonte ou na UF do empreendimento, o que impactaria em mudança no CEG; inicia com 1 e soma 1 a cada alteração).

#### 4.3.3 Análise e Seleção de Variáveis

Os métodos de seleção de variáveis que foram adotados em várias pesquisas incluem julgamento de especialistas, análise de componentes principais, abordagem passo a passo para a seleção de variáveis de entrada-saída ou ainda uma combinação de todos os itens listados. Adler e Golany (2001), Norman e Stoker (1991), Gollany e Roll (1989) sugerem a elaboração de uma lista inicial de fatores que seja a mais abrangente possível e que tenha a participação de especialistas no assunto para ajudar na escolha das variáveis.

Neste sentido, vislumbrou-se a necessidade da aplicação da *survey* autoadministrada para levantar as variáveis relevantes no setor florestal e de celulose, que se baseou no trabalho proposto por Salgado Junior *et al.* (2011) no setor sulcralcooleiro. No qual é aplicado o DEA para avaliar a eficiência de usinas de açúcar e álcool na região nordeste do estado de São Paulo.

Para identificar as possíveis variáveis, na primeira fase da pesquisa, o método selecionado foi qualitativo, por meio da aplicação de uma *survey* autoadministrada. Segundo Babbie (1999), as *surveys* são semelhantes ao tipo de pesquisa de “censo”, uma vez que colhem



dados de amostras representativa de uma população específica. No entanto, a “*survey* examina uma amostra da população, enquanto o censo geralmente implica uma enumeração da população toda.”, o que é inviável devido aos custos envolvidos e o tempo necessário.

A pesquisa *survey* pode ter uma das três finalidades: descritiva (pesquisador vai analisar como se dá a distribuição e os traços das populações estudadas); explicativa (o pesquisador tem a preocupação de descobrir o porquê da distribuição existente); e exploratória (o pesquisador utiliza em uma situação de investigação inicial, buscando elementos críticos, apresentando novas possibilidades (BABBIE, 2005). Portanto segundo Pinsonneault e Kraemer (1993), as *surveys* têm o propósito de promover descrições quantitativas de alguns aspectos da população estudada.

Nesse sentido, a finalidade da *survey* no presente trabalho foi exploratória, realizada por meio de uma *survey* autoadministrada. Cujas abordagens podem ser feitas por um questionário estruturado com questões pré-definidas aos respondentes, que podem usar diferentes meios. Por exemplo, entregar os questionários pessoalmente, por correio ou computador (e-mail, internet, intranet organizacional) (COOPER e SCHINDLER, 2016).

Para o auxílio na seleção de variáveis e construção do modelo DEA, a primeira tentativa de aplicação da *survey* foi pelo portal das empresas no *link* “Fale Conosco”, uma vez que, a maioria das empresas não disponibiliza e-mail de contato, apenas o canal de comunicação mais restrito de ouvidoria. Em alguns sites já está claro a maneira que as empresas fornecem as informações, Klabin (2018):

A Empresa reconhece a importância da informação para estudantes. Por isso, mantém em seu site conteúdo atualizado sobre a empresa, seus produtos e sua história, que podem contribuir com pesquisas acadêmicas. Navegue pelas páginas da Empresa, Negócios e Produtos, e Sustentabilidade. Consulte também nosso Relatório de Sustentabilidade, com detalhes dos programas e ações desenvolvidos pela companhia. Para informações financeiras, acesse o menu Investidores.

Outras empresas apresentam respostas por e-mail, no entanto, seguem o mesmo padrão (Suzano, 2018):

(...)No momento estamos impossibilitados de realizar retornos sobre questões específicas devido à quantidade de pesquisas estudantis que recebemos e o momento de transições em diversas áreas que estamos vivenciando. Para que você obtenha nossos dados em tempo hábil, aconselhamos o acesso em nosso site pesquise por: Relatório de Sustentabilidade poderá ser feito o download de nossas informações disponíveis para o mercado. No material, diversos dados estão acessíveis, como nossa atuação florestal e industrial, ações socioambientais, atuação de mercado, gestão de pessoas, resultados econômico-financeiros, localização de nossas unidades, produtos, certificações, entre outros. Também em nosso site, você encontra informações sobre a história da nossa Empresa, estrutura organizacional, entre outros detalhes.

A segunda tentativa foi conduzida por meio de um questionário autoadministrado. Foi disponibilizado aos representantes das indústrias por e-mail, por meio de um contato prévio por telefone com um especialista da empresa. Os questionários foram enviados em novembro de 2017 e foram respondidos até março de 2018. Foi priorizado o sigilo de nomes e cargos. O objetivo do questionário foi obter dados e informações sobre as características do setor de florestal, da produção de celulose e da geração de bioeletricidade. O contato prévio foi fundamental para retorno do questionário, no entanto só foi obtido retorno de quatro dos grandes grupos de empresas.

Foram apresentadas as variáveis que os representantes julgavam importantes e representativas no setor florestal, setor industrial e as variáveis de mercados. O Quadro 3 sintetiza as respostas e as informações dos representantes de quatro DMUs, elas estão classificadas aleatoriamente para manter sigilo das informações.

Quadro 3 – Variáveis Obtidas Através da *Survey*.

U1	<b>Setor Florestal-</b> Produtividade da Floresta- Imacel (Incremento médio de celulose medido em m <sup>3</sup> /ha/ano); Densidade básica (Kg/m <sup>3</sup> ); Estoque de pátio (toras + cavacos); Estoque de madeira no campo; Raio médio (km). <b>Setor Industrial-</b> Produção de celulose (ton.); (Custo caixa de produção - R\$ ou US\$); Consumo específico de madeira (m <sup>3</sup> /ton.); Rendimento no cozimento; Consumo de químicos por tonelada de celulose (soda, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, oxigênio); Consumo de químicos por tonelada de celulose (soda, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, oxigênio); Consumo de energéticos por tonelada de celulose (gás natural, óleo 3A, energia elétrica); Valor do MWh comercializado no grid de energia elétrica; Variáveis de qualidade (Número Kappa, Viscosidade, Alvura); Variáveis de produção (Impregnação dos Cavacos, Carga de Alkali, Sulfidez, Concentração dos Reagentes, Tempo e Temperatura (Fator-H). <b>Variáveis de mercado-</b> Preço da commodity US\$/ton; Dias de estoque de produto; Análise de demanda de mercado.
U2	<b>Setor Florestal-</b> Custo da terra – tanto para arrendamento como para compra; Produtividade da floresta: m <sup>3</sup> s/há/ano ou ton. celulose / há / ano; Raio Médio, pois um dos maiores custos da madeira é o transporte para fábrica; Custo de Colheita. <b>Setor Industrial-</b> Rendimento da planta é quanto entra de madeira e quantidade de celulose que sai ao final, e é medido sempre em % e gira e torno de 50 a 55%; Custos de Manutenção: são custos fixos que demonstram a capacidade de gerenciar o ativo e mantê-lo em boa condição de operação; Custos Variáveis: são os custos relacionados principalmente aos consumos de insumos, tais como, químicos e energéticos (óleo combustível e biomassa, por ex). <b>Variáveis de mercado-</b> Qualidade do Produto: por ser um produto commodity, isto é, produto padrão no mercado, a maior exigência do mercado é estabilidade da qualidade. No item qualidade entram variáveis como Alvura, Sujidade (evita impurezas que podem gerar quebras na máquina de papel e falhas no papel) e estabilidade nos quesitos de propriedades físicas da celulose, que ajudam a melhorar a produtividade da máquina e economizar na quantidade de celulose usada; Logística: por ser um produto de commodity, esse é um grande diferencial, pois quanto mais próximo ao cliente maior a eficiência e rapidez na entrega.
U3	<b>Setor Florestal-</b> Produtividade da Floresta: m <sup>3</sup> s/há/ano ou ton. celulose / há / ano; Raio médio (km); Custo de Colheita.; <b>Setor Industrial-</b> Produção total de celulose; Custo de Produção.
U4	<b>Setor Florestal-</b> Produtividade da Floresta: m <sup>3</sup> s/há/ano ou ton. celulose / há / ano; Raio médio (km); Custo de Colheita; Fatores naturais (edafoclimáticos); Excelência em melhoramento genético de florestas. <b>Indústrias-</b> Ritmo de produção através da metodologia de superfície de resposta (MSR); Eficiência; Qualidade para exportação; Custo caixa; Atendimento a requisitos ambientais; Indicadores de segurança. <b>Variáveis de mercado-</b> Florestal (principal) (edafoclimáticos); Ciclo de corte da Floresta (5-7 anos para Eucalipto); Industrial investimentos em fábrica de celulose; Capacidade instalada das fábricas; As novas fábricas possuem o estado da arte em tecnologia de produção; Ambiental; Abundância de recursos hídricos e matriz energética competitiva; O menor custo de produção no mundo e a maior sustentabilidade (técnico-econômica e ambiental).

**Fonte:** Elaborada pela autora a partir das pesquisas das respostas dos questionários (2017-2018).

A *survey* foi um importante instrumento para o levantamento e para condução na busca das variáveis disponíveis para análise de eficiência. As indústrias de celulose disponibilizam em seus *sites* como é a política para pesquisas acadêmica e, a partir das informações levantadas na *survey* em conjunto com os relatórios de sustentabilidade (2016), relatório de manejo florestal (2016) e planejamento energético (2016) foram escolhidas as variáveis para serem utilizadas no Modelo DEA, uma vez que todos os colaboradores foram unânimes em responder que algumas variáveis que eles julgavam importantes não são publicadas.

O número apropriado de entradas e saídas é frequentemente discutido na literatura. Enquanto o modelo DEA pode lidar com múltiplas entradas e saídas, observa-se que um número muito grande de entradas ou saídas em relação ao número de DMUs pode desordenar a análise ou resultar em um grande número de DMUs eficientes (ADLER e GOLANY 2001; GREGORIOU, SEDZRO e ZHU 2005). Assim, um dos principais problemas com os Modelos DEA é a seleção correta de *inputs* e *outputs*, bem como dificuldades nos pressupostos de homogeneidade e flexibilidade de restrições (DYSON *et al.*, 2001).

Senra *et al.* (2007) enfatizam que em casos com poucos números de DMUs, uma das opções é restringir as variáveis que vão entrar no modelo. Boussofiane *et al.* (1991) recomenda que o número de DMU deve ser maior que o produto dos *inputs* e *outputs*, enquanto Cooper *et al.* (2007), apontam que o tamanho mínimo da amostra deve ser ao menos três vezes maior do que a soma de *inputs* e *outputs*. Assim, dado o pequeno número de DMUs (9 indústrias) e a necessidade de identificar variáveis relevantes para o cálculo da eficiência, torna-se ainda mais importante a *survey* que norteou as escolhas dos dados que estavam disponíveis para aplicação do modelo DEA.

Por exemplo, com três entradas e duas saídas, Boussofiane *et al.* (1991) recomendam ter pelo menos seis DMUs. Portanto, a seleção de variáveis deve ser vista como instrumento de auxílio à decisão e que orienta a escolha final das variáveis relevantes. Deve-se salientar que no caso de usar as variáveis sem qualquer seleção ou método de pré-análise, são recomendados outros métodos de aumento de discriminação. (ADLER *et al.*, 2002; ANGULO MEZA e LINS, 2002; LETA *et al.*, 2005).

Foram definidos os *inputs* e *outputs* do setor florestal e da indústria de celulose selecionadas para esta pesquisa, que se enquadram na *survey* e se justificam pela relevância das respostas dos especialistas. Apesar de os *inputs* e *outputs* poderem ser definidos em diferentes unidades de medida, não se deve misturar medidas de índices (isso é, rácios ou percentagens) com medidas de volume, no mesmo modelo (DYSON *et al.*, 2001). Portanto, Thanassoulis (1996) ressalta que qualquer modificação no conjunto de variáveis selecionadas poderá ter

grande impacto no resultado da avaliação. No Quadro 4 são apresentadas as variáveis consideradas no modelo.

Quadro 4 - Variáveis Seleccionadas para os Modelos de Eficiência.

<b>Variáveis seleccionadas</b>
Madeira produzida para celulose (m <sup>3</sup> )
Número de pessoas empregadas na etapa industrial
Produção de celulose (ton)
Energia consumida (MWh)
Energia comercializada (MWh)

**Fonte:** elaborado pela autora.

Como apresentado por Barnum e Gleason, (2008) em indústrias de combustíveis fósseis os insumos de combustíveis, trabalho e capital não são substitutos, mas complementares, e uma maneira válida de lidar com esse fato ao usar modelos tradicionais de DEA é incluir apenas uma das variáveis complementares. Assim as variáveis seleccionadas com base nas respostas dos especialistas e na disponibilidade dos dados podem substituir um número alto de variáveis, pois para a produção de bioeletricidade as variáveis como madeira, trabalho e energia consumida também são complementares nesse processo produtivo.

#### 4.3.4 Definição do Modelo DEA

Após a definição das DMUs e das variáveis que compõem o modelo, a etapa seguinte consiste na definição da estrutura do modelo DEA. Sendo assim, o Quadro 5 sintetiza os modelos aplicados para a presente pesquisa e suas finalidades. A estimativa dos modelos foi realizada por meio do software estatístico Stata® 13.

*Quadro 5: Modelos DEA Aplicados.*

<b>Modelo</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Justificativa</b>
BCC – orientado ao <i>output</i>	Aplicaram-se o BCC orientado ao <i>output</i> para verificar o tipo de retorno de escala das DMUs.	Identificar o <i>ranking</i> de eficiência na produção de Bioeletricidade. Que é um <i>output</i> na indústria de celulose.
Fronteira invertida e Índice Composto	Com a finalidade de desempatar as DMUs consideradas eficientes, aplicou-se o índice Composto.	Falta de discriminação entre as DMUs, ou quando muitas DMUs são consideradas eficientes.
Modelo pós-eficiência: é baseado em regressão linear truncada	Relacionar as variáveis independentes (IDHM Firjan, Silvicultura, Capacidade Produtiva e Empregos terceirizados) com a variável dependente (Índice composto normalizado).	Identificar se externalidades influenciam de forma indireta a produção de bioeletricidade.

Os modelos propostos têm a finalidade de determinar a eficiência das indústrias de celulose (Autoprodução de Energia - APE e Produtor Independente de Energia - API) para a produção de bioeletricidade. Optou-se por prosseguir com a análise de eficiência e determinar os retornos de escala. Para avaliar os resultados do *ranking* produzidos pelo modelo geral BCC orientado *output*, aplicou-se o índice composto para a complementação como forma de promover o desempate das DMUs. (LETA *et al.*, 2005).

Além disso, apesar de as empresas operarem no mesmo ambiente de negócios, as características geográficas das regiões onde atuam são muito diferentes, justifica a utilização do modelo BCC, que apresenta retornos variáveis de escala (BANKER *et al.*, 1984). Quanto a orientação a ser seguida, como o objetivo da análise é avaliar a eficiência das DMUs quanto ao nível de produção de celulose e bioeletricidade, ou seja, no sentido de avaliar as variáveis de saída, a orientação indicada é para os *outputs*. Orientou-se o modelo ao *output*, ou seja, deseja-se maximizar os *outputs*, mantendo os *inputs* constantes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os modelos de eficiência elaborados em duas etapas: I) análise de eficiência e II) análise das externalidades. Conforme exposto, para a análise de eficiência, utilizou-se o método de Análise Envoltória de Dados (DEA) no modelo de Retornos Variáveis de Escala (BCC), com orientação ao *output* e o cálculo do Índice Composto. Para a análise de externalidades, optou-se pelo procedimento de regressão linear truncada.

### 5.1 Modelo 1: Produção de Celulose

As variáveis empregadas para a análise de eficiência do Modelo 1, seguem apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6- Modelo 1.

Tipo de Variável	Variável
<i>Input</i>	Madeira produzida para celulose (m <sup>3</sup> )
<i>Input</i>	Número de pessoas empregadas na etapa industrial
<i>Output</i>	Produção de celulose (ton.)

O Modelo 1 buscou verificar a eficiência das indústrias de celulose, geradoras de bioeletricidade na produção de celulose. Foram empregados como *inputs* a produção de madeira de eucalipto para a celulose(m<sup>3</sup>) e o número de pessoas empregadas na etapa industrial, e como *output*, empregou-se o volume de produção de celulose (ton.). Logo, calculou-se os *rankings* de eficiência, sintetizados na Tabela 9. Foram apresentadas as medidas de eficiência calculadas através do BBC-OO, em relação às fronteiras originais (Eficiência) e invertidas (Eficiência Invertida). Após realizado o cálculo do índice composto, que foi normalizado pelo seu valor máximo, a fim de obter medidas que variam de 0 a 1. A coluna *Ranking* é baseada nos resultados do índice composto normalizado.

Tabela 9: Escores de Eficiência do Modelo 1.

DMUs	Eficiência	Eficiência Invertida	1-Eficiência Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado	Ranking
	2016	2016	2016	2016	2016	
U. 01	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,7399	4
U. 02	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,7399	4
U. 03	1,0000	0,6484	0,3516	0,6758	1,0000	1
U. 04	0,8855	0,8699	0,1301	0,5078	0,7514	3
U. 05	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,7399	4
U. 06	0,9544	0,8204	0,1796	0,5670	0,8390	2
U. 07	0,8426	1,0000	0,0000	0,4213	0,6234	5
U. 08	0,6378	1,0000	0,0000	0,3189	0,4719	7
U. 09	0,8289	1,0000	0,0000	0,4145	0,6133	6
Média	0,9055	0,9265	0,0735	0,4895	0,7243	

O modelo DEA-BCC orientado para o *output* foi aplicado às 9 DMUs que representam as maiores empresas brasileiras de produção de celulose do Brasil. Para melhorar a discriminação das companhias e identificar a melhor, foi aplicado o método da fronteira invertida. Calcularam-se as eficiências clássicas e invertidas para cada DMU. Os resultados podem ser observados na Tabela 9. A média de eficiência pelo modelo clássico foi de 0,9055. e a média de eficiência nos índices compostos normalizados foi de 0,7243. Todas as empresas atingiram a fronteira de eficiência no modelo BBC-OO, o que mostra que as empresas analisadas possuem alto grau de especialização na produção de celulose de mercado e que são empresas com alto grau de tecnologia.

Utilizou-se a aplicação da fronteira invertida e observou-se que as DMUs que apresentaram bom desempenho na fronteira clássica também apresentaram mal desempenho na fronteira invertida. Segundo Mello *et al.* (2008), uma DMU é considerada realmente a melhor quando tem bom desempenho nas variáveis em que é melhor (fronteira clássica), bem como apresenta um mau desempenho no critério em que é pior (fronteira invertida).

Justificou-se a utilização do índice composto para desempate das DMUs U.01, U.02, U.03 e U.07. Após a aplicação dos índices compostos normalizados, a U. 03 continuou sendo a mais eficiente na produção de celulose, embora o escore de eficiência tenha sofrido alterações nas demais empresas. Assim, como não foi possível saber a companhia mais eficiente somente pelo cálculo da eficiência clássica, o método da fronteira invertida foi aplicado, a partir dos dois resultados anteriores, o que permitiu identificar, assim, as melhores indústrias no ano de 2016, de acordo com as variáveis selecionadas no modelo. O Ano de 2015 e 2016 foi marcado por expansões no setor e muitas indústrias naquele momento passavam por processos de reestruturações, a exemplo da U.04, U.08 e U.09.

## 5.2 Modelo 2: Produção de Bioeletricidade

As variáveis empregadas para a análise de eficiência do Modelo 2 seguem apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7- Modelo 2 Produção de Bioeletricidade.

Tipo de Variável	Variável
<i>Input</i>	Madeira produzida para celulose (m³)
<i>Input</i>	Número de pessoas empregadas na etapa industrial
<i>Input</i>	Energia consumida (MWh)
<i>Output</i>	Energia comercializada (MWh)

O Modelo 2 analisou a eficiência das indústrias de celulose em comercializar a bioeletricidade. Foram empregados como *inputs* a produção de madeira de eucalipto para celulose, o número total de pessoas empregadas na indústria e a energia consumida. Como *output*, empregou-se a energia comercializada. Nesse caso houve a DMU U.01 foi desconsiderada neste modelo, porque não comercializa bioeletricidade. Os escores de eficiência desse modelo seguem esquematizados na Tabela 1.

Tabela- 10: Escores de Eficiência do Modelo 2.

DMUs	Eficiência	Eficiência Invertida	1-Eficiência Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado	Ranking
	2016	2016	2016	2016	2016	
<b>U. 01</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
<b>U. 02</b>	1,0000	0,4931	0,5069	0,7535	1,0000	1
<b>U. 03</b>	1,0000	0,5746	0,4254	0,7127	0,9459	2
<b>U. 04</b>	1,0000	0,7343	0,2657	0,6329	0,8399	3
<b>U. 05</b>	0,2081	1,0000	0,0000	0,1040	0,1381	6
<b>U. 06</b>	0,7444	0,8084	0,1916	0,4680	0,6211	4
<b>U. 07</b>	0,3515	1,0000	0,0000	0,1758	0,2333	7
<b>U. 08</b>	0,0785	1,0000	0,0000	0,0392	0,0521	8
<b>U. 09</b>	0,7263	0,9369	0,0631	0,3947	0,5239	5
<b>Média</b>	0,6386	0,8184	0,1815	0,4101	0,5442	

Por meio do modelo BCC com *outputs* tradicionais, a média de eficiência para a comercialização de bioeletricidade foi de 63,86% e para o índice composto normalizado foi de 48%. Tais valores são considerados baixos para a eficiência das indústrias no que diz respeito a comercialização de bioeletricidade.



Apenas 5 DMUs foram consideradas eficientes na Modelo BCC-OO na eficiência tradicional (U.02, U.03, U.04, U.06 e U.09), estando as demais abaixo de 0,50. O menor escore de eficiência foi da U. 05, com 0,20.

Os resultados apontam que a única DMU mais eficiente (índice composto) foi a U. 02, ou seja, essa empresa obteve o melhor desempenho nas avaliações realizadas com BCC-OO padrão e com índice composto normalizado. Isso significa que ela possui o melhor aproveitamento de seus recursos (Madeira produzida para celulose, quantidade de funcionários e consumo de energia por quantidade produzida), consegue agregar com eficiência a produção de celulose e obter vantagem competitiva com a energia comercializada.

### 5.3 Modelo 3: Produção de Celulose e Bioeletricidade

As variáveis empregadas para a análise de eficiência do Modelo 3 seguem apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8- Modelo 3- Produção de Celulose e Bioeletricidade.

Tipo de Variável	Variável
<i>Input</i>	Madeira produzida para celulose (m <sup>3</sup> )
<i>Input</i>	Número de pessoas empregadas na etapa industrial
<i>Input</i>	Energia consumida (MW/h)
<i>Output</i>	Produção de celulose (ton.)
<i>Output</i>	Energia comercializada (MW/h)

O Modelo 3 analisou a eficiência das indústrias de celulose em produzir celulose e comercializar a bioeletricidade. Foram empregados como *inputs* a produção de madeira de eucalipto para celulose (m<sup>3</sup>), o número total de pessoas empregadas na indústria e a energia consumida. Como *output*, empregaram-se o volume de produção de celulose (ton) e a energia comercializada (MW/h) no ano 2016. No modelo foram calculados os *rankings* de eficiência, as medidas de eficiência em relação às fronteiras originais e invertidas da DEA e o índice composto normalizado. A Tabela 11 apresenta os escores de eficiência desse modelo.

Tabela 11- Escores de Eficiência do Modelo 3.

DMUs	Eficiência	Eficiência Invertida	1-Eficiência Invertida	Índice Composto	Índice Composto Normalizado	Ranking
	2016	2016	2016	2016	2016	2016
U. 01	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,8132	4
U. 02	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,8132	4
U. 03	1,0000	0,7703	0,2297	0,6149	1,0000	1
U. 04	1,0000	0,9983	0,0017	0,5009	0,8146	3
U. 05	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,8132	4
U. 06	1,0000	0,9546	0,0454	0,5227	0,8501	2
U. 07	0,8909	1,0000	0,0000	0,4455	0,7245	6
U. 08	0,9234	1,0000	0,0000	0,4617	0,7509	5
U. 09	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,8132	4
Média	0,9794	0,9692	0,0308	0,5051	0,8214	

A média de eficiência para o BCC-OO de todas DMUS foi de 0,9794, no modelo clássico, o que significa que praticamente todas as indústrias atingiram a eficiência máxima, que apenas a U. 07 e a U.08 não empataram. Quando avaliadas sobre a ótica de celulose e energia comercializada, e que a U. 01 não comercializa energia, mas o seu desempenho pode ser explicado devido à produção de celulose e ao baixo consumo de energia. Ao aplicar o índice composto normalizado quatro DMUs continuaram empatadas (U.01, U.02, U.05 e U.09), sendo que a U.03 continua a mais eficiente no retorno de escala constante. Isso pode ser explicado pois todas as empresas que foram estudadas são empresas que apresentam as melhores tecnologias de produção e passaram por modificações em sua planta produtiva, com aumento na capacidade de produção e modernização dos equipamentos. A idade técnica da indústria tem um grande impacto, os equipamentos e processos estão passando por transformações de forma a maximizar a produção de bioeletricidade nas indústrias de celuloses. Quanto mais recentes os projetos, mais eficiente é a produção e mais se consolida o novo modelo de negócios das indústrias de celulose.

Dessa forma, os resultados do Modelo 3 corroboram com os preceitos discutidos no Capítulo 2 sobre a diferença de cada modelo DEA. As indústrias de celulose são eficientes na produção e na utilização de energia, uma vez que todas geram energia para sua própria produção e o excedente pode ser comercializado e disponibilizados para o sistema elétrico do país. As principais empresas brasileiras produtoras de celulose do mercado passaram por processos de reestruturação, aumentando sua competitividade frente às grandes empresas mundiais. São exemplos de reestruturação: Camaçari/BA, Eunápolis/BA, Mucuri/BA, Aracruz/ES, Belo Oriente/MG e, posteriormente com implantação de novos projetos, Três Lagoas/MS e Imperatriz/MA.

Esta análise refletiu os diferentes níveis tecnológicos dos sistemas de produção de celulose e bioeletricidade do país. Algumas DMUs produtoras, como a U. 01, apresentam uma boa eficiência na produção de celulose, mas não comercializam energia, embora ela produza parte da sua energia consumida. Outra questão para ressaltar é que parte da madeira é comprada de pequenos produtores, o que representa 8% da madeira consumida, portanto, ela fomenta, por meio de parceria, a silvicultura local (Programa de Incentivo Florestal).

As DMUs consideradas eficientes neste estudo são eficientes apenas em relação às restantes DMUs incluídas nesta amostra. É possível que existam outras DMUs (não incluídas na amostra) que detenham níveis de eficiência superiores aos obtidos pelas unidades de melhores práticas incluídas na amostra. As indústrias avaliadas são tecnicamente eficientes em produção e comercialização de bioeletricidade, o que significa que qualquer planta tecnicamente ineficiente só poderia ter eficiência energética adquirida com a implantação de parques industriais modernos com grandes investimentos.

Outro ponto de destaque é a comercialização e cogeração de excedente de bioeletricidade das indústrias de celulose. A Bioeletricidade poderia ser uma alternativa para os municípios onde as indústrias estão inseridas, a fim de alterar as preferências de escolha por uma energia renovável de biorrefinarias tecnicamente eficientes e limpas. Uma forma de se comercializar a bioeletricidade é vender o excedente produzido a empresas terceiras localizadas nas proximidades da geradora.

Essa oferta de energia é chamada de Geração Distribuída<sup>11</sup>. Toledo *et al.* (2012) destacam a geração distribuída oferece inúmeras vantagens, uma vez que, a disposição da unidade de geração próxima à carga permite a redução das perdas associadas ao transporte de energia elétrica.

Assim, as tecnologias mais eficientes, com possibilidades de gerar menos externalidades negativas, seja nos processos de geração, transmissão ou ainda distribuição de energia elétrica, e que contribuem para o aumento da capacidade instalada do setor elétrico brasileiro, são uma opção para possíveis soluções dos problemas vinculados ao aumento da demanda de energia (ANEEL, 2014; DIAS *et al.*, 2002; SOCCOL *et al.* 2015; BERGER e INIEWSKI, 2015).

---

11 “(...) consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade” (ANEEL, 2018).

## 5.4 Modelo Pós-Eficiência

O foco desta seção são as externalidades positivas e negativas que envolvem as indústrias de celulose produtoras de bioeletricidade e que influenciam o comportamento da eficiência nessa indústria, por meio de uma análise pós-eficiência. O modelo DEA é frequentemente classificado como determinístico uma vez que as entradas são conhecidas e as simulações são obtidas através das entradas e saídas analíticas, mas neste caso é difícil identificar os impactos que influenciam a eficiência. Assim, Bogetoft e Otto (2011) consideram que os testes estatísticos têm sido muito utilizados. Para análise de pós-eficiência, Fried *et al.* (2002) destacam que o desempenho de uma DMU é influenciado por três diferentes fatores: a gestão das atividades, as características ambientais onde as atividades acontecem e o impacto de fatores não sistemáticos, variáveis omitidas e fenômenos relacionados.

Os índices de eficiência calculados pelo DEA, além de ranquearem as indústrias sob a perspectiva de eficiência na produção e comercialização de bioeletricidade, podem também ser utilizados como variável dependente em um modelo de regressão linear truncada, caracterizando-o por dois estágios. Assim, a análise de pós-eficiência no segundo estágio aproxima os indicadores da realidade empírica das indústrias, uma vez que não controlam plenamente todos os fatores que interferem nos níveis produtivos. As variáveis que influenciam a função de produção da empresa, mas não estão sobre o seu controle, são chamadas de variáveis ambientais (COELLI *et al.*, 2005).

A variáveis externas têm impactos e influência nas DMUs. Dessa forma, a análise pós-eficiência, por sua vez, demanda um conjunto de informações sobre as características ambientais, além dos dados de *input* e *output*, e o desenvolvimento de um modelo que incorpore características ambientais dentro do procedimento de avaliação de externalidades. Além disso, segundo vários pesquisadores (SIMAR, 1992; FRIED *et al.*, 2002; BOGETOFT e OTTO, 2011; SIMÕES *et al.*, 2010; ZHANG *et al.* 2016; HOSSEINZADEH *et al.*, 2016; JEBALI *et al.*, 2017), a análise de pós eficiência é conhecida como segundo estágio e complementa o modelo DEA.

Para complementar a proposta desta tese foi aplicada a regressão linear truncada, técnica capaz de atribuir alguma porção da variação da performance a efeitos de ruído estatístico. Para capturar a influência das externalidades, diante das informações apresentadas para as três primeiras atividades das indústrias de celulose (produção florestal, produção de celulose e produção de bioeletricidade), foram identificadas externalidades de acordo com a pesquisa e baseadas nos estudos relacionados no Quadro 9.

Quadro 9- Embasamento Teórico as Externalidades.

EXTERNALIDADE	EFEITO EXTERNO	POSITIVA/ NEGATIVA	FONTE
<b>Alterações no meio físico</b> <b>Monocultura de eucaliptos</b>	Reflorestamento; Área de preservação	Positiva	Farinaci, J. S., e de Estudos, P. C. D. N. (2012). Vital, M. H. F. (2007).
	Redução de biodiversidade	Negativa	Marques, M. I. M. (2016).
<b>Utilização de maquinários e veículos</b>	Aumento de veículos;	Negativa	Cavalcanti, M. C. B. (2011). Ximene et al. (2010).
	Emissão de gases de poluentes	Negativa	Souza, E. D. (2009). Piotto, Z. C. (2003).
<b>Desenvolvimento regional</b>	Valoração imobiliária	Positiva	Martins e Kamimura. (2012).
			Rossato <i>at al.</i> (2017)
<b>IDHM</b>	Aumento na renda	Positiva	Silva Soares <i>at al.</i> (2014). Lábaj, Luptáčík and Nežinský (2014). Rossato <i>at al.</i> (2018). Andrade, R. (2018).
<b>Eficiência energética</b>	Redução do uso de combustíveis fósseis.	Positiva	Jacobsson e Sandén. (Budzianowski, W. M. (2017).
	Contribui com a matriz energética (energia renovável)		Gavrilescu, M. (2014). Ragauskas, A. J., Nagy. Kim <i>at al.</i> (2006).
<b>PIB</b>		Positiva	Rossato <i>at al.</i> (2018).
<b>Número de posto de empregos</b>	Aumento na renda	Positiva	Andrade, R. (2018). Tisott Waquil, P. D. (2017).

Fonte: Elaborado pela autora.

Das externalidades apresentadas no quadro acima, verifica-se a que as externalidades negativas estão em sua maioria associadas aos impactos ambientais. Partindo dos conceitos apresentados anteriormente no capítulo 2, algumas ferramentas são utilizadas para examinar como as externalidades afetam a economia e como elas podem ser internalizadas.

Assim, quando se trata de externalidades ambientais, existem Princípios do Direito Ambiental, dotados de plena normatividade, específicos e aptos às correções das externalidades ambientais. Dessa forma, por meio dos Princípios do Poluidor-Pagador e do Princípio do Usuário-Pagador, ambos adaptados da economia, tenta-se corrigir e amenizar as externalidades ambientais negativas, ou seja, a tributação pode ser tratada como ferramenta de correção das externalidades ambientais (BURSZTYN, 1994; LEMOS, 2008; PADILHA, 2010; MILARÉ, 2011; CAVALCANTI, 2011; TEIXEIRA, 2012).

Corroborando com pensamento das correções das externalidades ambientais, Baumol e Oates (1988) colocaram que uma taxa de imposto que é definida em um nível que alcance a redução desejada na emissão total de poluentes satisfará as condições necessárias para a minimização dos custos do programa para a sociedade. Pode-se observar que existe um *trade off* entre o desenvolvimento e o crescimento econômico e os impactos ou externalidades negativas no meio ambiente e na sociedade, por essa razão, são aceitos juridicamente e

socialmente pela sociedade moderna, sendo perceptível a tolerância a tais impactos, desde que se produzam dentro dos limites de legalidade e aceitabilidade (GERENT, 2006).

Nesse contexto existe um consenso entre os economistas de que o uso de tributação ambiental é visto como instrumento de redução de externalidades da atividade econômica, podendo ser visto como uma consequência do modelo econômico e como uma das mais discutidas críticas de Coase (1960) ao modelo de Pigou (1920), o qual não compara os efeitos da extinção ou adoção da degradação sobre o bem-estar social.

Com base nos estudos de externalidades apresentados, selecionou-se as variáveis que estariam disponíveis para a análise de pós-eficiência, são elas: IDHM Firjan, Área total de silvicultura, Capacidade instalada e Empregos terceirizados.

Quadro 10- Variáveis para a Análise de Pós-Eficiência.

Análise pós-eficiência para identificar as externalidades que influenciam o comportamento da eficiência das indústrias geradoras de bioeletricidade.	H1: IDHM Firjan
	H2: Área total de silvicultura
	H3: Capacidade instalada
	H4: Empregos terceirizados

Fonte: Elaborado pela autora.

Após calculados os escores de eficiência das indústrias de celulose produtoras de bioeletricidade selecionadas para estudo, por meio do índice composto, foram analisadas as externalidades que influenciam o desempenho das DMUs na comercialização de bioeletricidade; para isso, foi utilizada a regressão linear truncada. A equação estabelecida para análise do impacto desses fatores é rerepresentada na equação abaixo.

Nesse contexto, o modelo econométrico utilizado está descrito na Eq. 7.

$$IC^{Modelo\ 3} = \beta_0 + \beta_1 IDHM + \beta_2 S + \beta_3 CI + \beta_4 ET + \varepsilon \quad (7)$$

Onde:  $IC^{Modelo\ 3}$ : Índice Composto do Modelo 3 de eficiência;  $\beta_0$ : intercepto;  $\beta_1 IDHM$ : Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Firjan;  $\beta_2 S$ : área de silvicultura;  $\beta_3 CI$ : capacidade instalada,  $\beta_4 ET$ : empregos terceirizados; e  $\varepsilon$ : erro aleatório.

Os resultados, calculados pelo método usando o score de eficiência do índice composto do modelo BCC-Output encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12: Score de Eficiência do Índice Composto do Modelo BCC-Output.

Variável dependente		Variáveis independentes			
		IDHM Firjan	Área total a silvicultura	Capacidade instalada	Empregos terceirizados
Índice Composto – M3	Coef. <sup>12</sup>	-1.457	0.0456	-0.0907	0.122
	p-value <sup>13</sup>	0,000	0,001	0,073	0,004
<b>p&lt;0.05,</b>					

Fonte: Elaborada pela autora.

H1: IDHM Firjan tem impacto negativo sobre a eficiência das indústrias de celulose na produção de celulose e bioeletricidade. Embora os fatores que implicam a variação dos IDHM sejam complexos, os mesmos não podem ser atribuídos unicamente às indústrias de celulose ou à comercialização de bioeletricidade. O coeficiente negativo do IDHM demonstra que a implantação das indústrias em suas respectivas cidades não promoveu necessariamente um aumento dos indicadores sociais. A análise orienta-se de maneira contrária, ou seja, a atuação dessas indústrias pode ter contribuído para fatores que levam a retração do IDHM, como concentração de renda, pouca geração de emprego e pouco impacto para a educação. Pode ser atribuído esse fator por se tratarem também de empresas de alta tecnologia e mecanizadas.

As indústrias de celulose estudadas apresentam em seus relatórios de sustentabilidade. Projetos com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento local. Foram feitos vários investimentos em institutos de pesquisas sem fins lucrativos, atendendo as esferas educacional, de pesquisa, de tecnologias e contribuindo para programas sociais. Corroborando com os resultados, Reynaud (2007) conclui que não se pode afirmar que haja desenvolvimento local integrado e sustentável sem considerar os efeitos do crescimento econômico e de todas as esferas pública e privada, uma vez que os programas desenvolvidos pelas indústrias não conseguem demonstrar efetivamente a participação na composição do IDHM das cidades onde estão inseridas.

Portanto, o *trade off* do crescimento econômico visto como condição necessária, não é suficiente para promover o desenvolvimento humano e os benefícios sociais (KLIKSBERG, 2001; SACHS, 2004). Em suma, as empresas, para atingirem seus objetivos operacionais, responsabilidade social e ambiental, passaram a fomentar os diversos agentes locais de desenvolvimento, para tornar possível suas ações de responsabilidade social e ambiental junto às comunidades onde atuam.

<sup>12</sup> Coef.: coeficiente de correlação, eles significam o quanto cada variável contribui para a variável dependente no caso Ind. Composto M3.

<sup>13</sup> P-value: é a probabilidade significância do resultado apresentado.

H2: Área total de silvicultura - o coeficiente positivo indica que nessas localidades a área de silvicultura aumentou. A silvicultura demanda grandes áreas de terra, diferente da criação de bovinos, que, quando confinados, ocupam pequenas áreas (ROSSATO *et al.*, 2017). Assim, a tendência e a expansão das áreas plantadas por eucaliptos em áreas próximas às indústrias de celulose aumentam, uma vez que outra variável importante para os gestores é o raio de distância da floresta e da indústria. As indústrias estudadas têm instalações estratégica, sendo instaladas na proximidade das áreas produtoras de matéria-prima, com uma média de 120 km de raio de distância da floresta. Estão também próximas do entroncamento de eixos de transporte e circulação por onde é escoada a sua produção. Outro fator que reforça essa influência positiva da silvicultura é que segundo ABDI (2012), a produtividade do eucalipto no Brasil em 2010 já era em torno de 41 m<sup>3</sup>/ha/ano, com potencial de elevar este valor para 70 m<sup>3</sup>/ha/ano.

Para Marques (2016), espaços marcados pela presença de extensos eucaliptais são constituídos por paisagens rurais homogeneizadas, expressão do denominado “deserto verde”. Por outro lado, Farinaci (2012), em suas análises, afirma que os impactos ambientais do eucalipto dependem da forma como esses plantios são manejados e que existem funções ecológicas que favorecem mais a recuperação por sucessão secundária do que pastagens. Contudo, isso depende da efetiva implementação e avaliação do sistema de manejo proposto para cada situação.

Segundo Moll (2016), as plantações e indústrias de árvores fomentam economias locais, geram empregos e aliviam a pressão sobre as florestas naturais, além de criarem externalidades positivas, quando são estabelecidas em terras degradadas, restauram solos, sequestram carbono e ajudam a satisfazer a demanda global de papel.

Corroborando com esse pensamento, Vital (2007) analisou o efeito das plantações de eucalipto sobre quatro variáveis: a água, o solo, a biodiversidade e o ar. Concluiu que o impacto depende fundamentalmente das condições prévias ao plantio, da região onde foi implantada a floresta, do bioma onde será inserida e das técnicas de manejo empregadas.

Assim, considerando os aspectos positivos, pode-se destacar: na água, o dano se daria se fossem plantações próximas às regiões com volume pluviométrico inferior a 400 mm/ano, contudo a maioria está localizada em regiões com volumes superiores a 1200 mm/ano, o que não ocasionaria déficit de água. Com relação ao solo, se foi plantado em solo já degradado por outras culturas, (savana ou em pastagens) há aumento dos nutrientes no solo, sobretudo pela mineralização da serapilheira. Sobre a biodiversidade, em comparação com diferentes formas de vegetação nativa, as plantações de eucalipto apresentam menor variedade de espécies (vegetais e animais). Finalmente no ar, as plantações de eucalipto, por meio do sequestro de gás



carbônico durante sua fase de crescimento, contribuem para a redução do efeito estufa (VITAL, 2007).

Portanto, as discussões sobre as áreas de silvicultura e sobre os impactos ambientais e sociais dos plantios de eucalipto são intensas e com grandes controvérsias. Diversas pesquisas apresentam suas vantagens e desvantagens. É um tema polêmico, mas o foco deste trabalho não é fazer uma revisão aprofundada acerca dos prós e contras, e sim identificar como essa variável influencia no comportamento da eficiência das indústrias avaliadas.

H3: Capacidade instalada - O coeficiente negativo da capacidade instalada demonstrou que ela tem uma relação contrária com o índice composto, ou seja, em indústrias com uma capacidade instalada maior, o índice composto tende a cair. Os resultados encontrados sugerem aspectos relevantes: em primeiro lugar, não foi verificada uma relação direta entre tamanho e eficiência operacional, tendo em vista que existem usinas eficientes capacidade instalada maior e menor. Constatou-se também a presença de indústria ineficientes com capacidade maior instalada.

Dessa forma, os resultados encontrados fornecem indícios de que a eficiência operacional não está diretamente relacionada à capacidade instalada das indústrias estudadas. Corroboram com essa afirmação Salgado Junior *et al.* (2009), a eficiência nas análises do modelo DEA independe do tamanho da usina, pois o importante é a proporção entre os inputs e outputs do modelo que tornam a DMU eficiente ou não. As tecnologias utilizadas nas indústrias são semelhantes, os mesmos processos produtivos (que é um requisito para se utilizar DEA) e o principal output é uma *commoditie*, assim, nesse caso as divergências entre tamanho e eficiência só podem ser justificadas por meio dos *inputs*.

De acordo com a *survey* alguns fatores, como rendimento da planta, quantidade de madeira, alterações no processo de plantio até sua colheita, umidade e qualidade da madeira, podem interferir no rendimento, ou seja, na quantidade de celulose que processada. O ritmo de produção é uma variável que também pode interferir na eficiência da produção tanto de celulose quanto de bioeletricidade.

H4: Empregos terceirizados- O coeficiente positivo dos empregos terceirizados demonstra que essas empresas contribuíram para a geração de empregos terceirizados nos municípios onde estão instaladas as empresas analisadas. Martins e Kamimura (2012) concluíram que o aumento demográfico de trabalhadores laborais, novos empreendedores dos segmentos da cadeia produtiva de papel e celulose e outras áreas, são atraídos para as cidades com indústrias de celuloses e papel. Tais transformações ocorrem devido a reprodução de capital intensificado pelas atividades industriais e das atividades comerciais, que potencializam em vários setores da economia.

O setor de celulose e papel, em virtude de suas características produtivas e elevado desenvolvimento tecnológico, possuem um número significativo de trabalhadores terceirizados no processo florestal. De acordo com Leite (2002), a maior parte dos serviços relacionados ao processo produtivo florestal é realizado por terceiros. Outras atividades, tais como, pré-plantio, manutenção de máquinas e até recursos humanos também estão sendo terceirizadas. O estudo constatou ainda que todas as empresas pesquisadas possuem alta capacidade de monitorar o desempenho de seus fornecedores, corroborando a ideia de Bozarth e Handfield (2013), que considera tal fator como positivo para a terceirização. Assim, a criação de novos postos de trabalho tem maior significância para as indústrias de celulose na sua base florestal, que produz a madeira principal *input* tanto para geração de bioeletrecidade como de celulose.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 Considerações Finais**

Este estudo teve por objetivo avaliar a eficiência das indústrias registradas na ANEEL que geram bioeletricidade como alternativa energética sustentável, assim como identificar as externalidades que influenciam de maneira indireta o comportamento dessa eficiência. Para atingi-lo e para garantir que o tema proposto fosse adequadamente tratado, a revisão de literatura abordou os principais aspectos relacionados à análise de eficiência e em especial sua aplicação no contexto da eficiência energética e das externalidades. Além disso, a revisão de literatura apresentou vários modelos de avaliação de externalidades que serviram de subsídios para identificar as externalidades que influenciam a eficiência das indústrias que produzem bioeletricidade.

Como método para o cálculo da eficiência, o modelo DEA BBC-OO, a análise da fronteira invertida e o índice composto normalizado foram utilizados. Na segunda etapa, a regressão linear truncada foi empregada. Foi necessário seguir essas etapas porque a quantidade de DMUs era baixa e apresentou-se alto grau de eficiência entre elas, o que poderia prejudicar a capacidade de discriminação do modelo DEA. A finalidade da segunda etapa era identificar as externalidades que influenciam o comportamento das indústrias que produzem bioeletricidade. Assim, uma das contribuições deste estudo foi a utilização de um procedimento de avaliação de pós-eficiência, que permite corrigir o viés estimado da pontuação de eficiência e melhorar a eficiência estatística com o procedimento de regressão (SIMAR e WILSON, 2007). Portanto, os resultados obtidos neste estudo podem ser considerados mais significativos.

Considerando a estrutura das empresas de celulose, as 9 DMUs avaliadas, possuem enorme potencial de produzir e comercializar a bioeletricidade, a partir de biomassa e licor negro. Uma das principais vantagens é a diminuição e dependência de combustíveis fósseis e a capacidades destas DMUs em promover o desenvolvimento sustentável com geração de uma fonte renovável de energia.

A influência das externalidades positivas e negativas sobre as áreas de silvicultura e os impactos ambientais e sociais dos plantios de eucalipto são intensamente discutidos na literatura. Constatou nesta tese, uma variável que exerce influência positiva. Promovem às indústrias de celulose instaladas vantagens competitivas para a produção de celulose e bioeletricidade. Além disso, a produção de florestas plantadas, contribuiu para a neutralidade de CO<sub>2</sub>.

Apartir desta pesquisa pode-se constatar que exemplos de externalidades negativas são mais evidenciados e estudados, como poluição, ruído, trânsito e alteração no meio ambiente. Esse fato pode ser atribuído às externalidades estarem, em sua maioria, relacionadas com problemas ambientais e podem ser internalizadas com ações que dependem da intervenção do governo por meio de tributos ou taxas. Por outro lado, as externalidades positivas, como difusão de tecnologias, conhecimento, geração de emprego e aumento na renda, recebem menos atenção.

As externalidades sobre o meio sócioeconômico aparecem como um importante componente que precisa ser investigado com maior detalhamento, pois envolve toda uma dinâmica espacial, como a migração de pessoas e famílias de outras regiões, a infra-estrutura, e a construção de um novo cenário sócioeconômico. Dessa forma, o resultado do aumento demográfico de trabalhadores e novos empreendedores dos segmentos da cadeia produtiva de papel e celulose que são atraídas aos municípios onde as indústrias estão inseridas (MARTINS e KAMIMURA, 2012), produzem as incertezas e impactos gerados pelas indústrias. Portanto, políticas públicas são necessárias para um planejamento que agregue desenvolvimento econômico, social, ambiental e energético.

Os resultados foram satisfatórios, pois as empresas avaliadas são eficientes em energia, ou seja, produzem sua própria energia e ainda são capazes de produzir excedente para a comercialização. A utilização da bioeletricidade de biomassa de resíduos florestais e licor negro, novo *player* de negócio das indústrias de celulose, pode auxiliar no desenvolvimento sustentável da região onde estão inseridas.

Com relação à contribuição para o estado da arte, é importante mencionar que não foi localizado na literatura outro trabalho que analisasse a eficiência na produção de bioeletricidade utilizando o modelo DEA e análise de pós-eficiência com os índices compostos nas indústrias de celulose. As influências das externalidades como variáveis explicativas motivaram a realização deste trabalho, no entanto, cabe ressaltar que os estudos apresentam um retrato de um único período avaliado.

A utilização da biomassa como fonte de energia é uma alternativa que contempla a vocação natural do Brasil, constatados no Capítulo 2. As condições edafoclimáticas são favoráveis às florestas plantadas e desempenham um papel importante na manutenção das características biológicas e climáticas do planeta, bem como, geram riqueza por meio do uso de recursos florestais. O país também tem disponibilidade de terras e está entre os melhores que podem produzir florestas com valor econômico e estratégico. Outro aspecto relevante nas florestas de eucalipto é serem uma das poucas árvores que, devido às suas características de crescimento surpreendentes, são capazes de reduzir a maior distância entre a procura e a

produção de madeira ao menor tempo possível, o que contribuiu para diminuição do desmatamento (CHANDRA e YADAVA, 1986).

As fontes de energias discutidas no Capítulo 2 colocaram o país em uma posição favorável, com sua matriz energética predominantemente hidráulica e grande participação de fontes renováveis. No entanto, o país assume compromissos de aumentar a participação de fontes renováveis. Assim, responder ao desafio da mudança climática requer um enorme desenvolvimento e a difusão de tecnologias (BERGEK *et al.*, 2008). A indústria de celulose, portanto, passa a contribuir de forma mais significativa com a matriz energética nacional, consequentemente gera uma externalidade positiva para o país.

Com a produção da bioeletricidade, as indústrias de celulose contribuem para a segurança no abastecimento energético, a diminuição da dependência energética, a diversidade do abastecimento energético e o aumento do uso de energia sustentável. A análise em segundo estágio apresenta resultados condizentes com os encontrados na literatura. A maioria das variáveis explicativas escolhidas apresentou resultados significativos, o que reforça a influência das indústrias produtoras de bioeletricidade com o ambiente onde estão instaladas.

É imprescindível identificar em quais condições pode-se competir com esses novos *players* de negócios. A indústria de celulose é um setor importante para a economia global e contribui positivamente para a balança comercial dos países produtores de celulose. O Brasil possui vantagem competitiva na produção de exportação de celulose (ROSSATO *et al.*, 2018), já que a economia das biorrefinarias está na vanguarda de uma perspectiva na qual os combustíveis fósseis são substituídos por biorenováveis (GAVRILESCU, 2014).

Assim, as projeções de aumento na produção têm potencial para por o país em uma posição singular no mercado de bioeletricidade oriundos de madeira plantada. Por meio da modernização de indústrias existentes com novas instalações (biorrefinarias) ou da construção de instalações totalmente novas e integradas. Em suma, apesar das controvérsias em torno das indústrias, e de críticas aos relatórios de sustentabilidade, este estudo mostra que a indústria de celulose tem impactos significativos e importantes tanto para economia, quanto para o desenvolvimento sustentável.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

A análise apresentada nesta tese tem considerado apenas entradas e saídas que são atualmente reconhecidas pelo mercado e divulgadas pelas indústrias. No entanto, muitos processos de produção das indústrias de celulose para a produção de bioeletricidade podem criar saídas com consequências sociais, ecológicas e econômicas que são desconhecidas pelo

mercado e, muitas vezes, não divulgadas. Uma avaliação no processo produtivo das indústrias de celulose deve incluir tais impactos, uma vez que podem produzir externalidades positivas ou negativas para a sociedade.

Entende-se que as indústrias de celulose produtoras de bioeletricidade têm grandes impactos nas regiões onde estão inseridas e que envolvem um trabalho multidisciplinar; para isso, é necessário um levantamento de diversas variáveis, como ambientais, sociais, econômicas, fisiológicas e biológicas. Portanto, a necessidade de pesquisas é constante. Sendo assim, sugere-se para os próximos trabalhos:

- Ampliar o escopo da pesquisa, por meio da criação de um grupo multidisciplinar que possa ter participação das empresas, das universidades e do governo. Com isso, montar um banco de dados que subsidie mais pesquisas com respostas rápidas. Uma das limitações foram que os dados não estão disponíveis, pois algumas empresas detêm as informações e utilizam-nas para a comercialização, o que inviabiliza pesquisas mais consistentes. Por se tratar de ações que têm impactos em toda sociedade, ambiente político e econômico, é necessária mais atenção e incentivo com políticas que viabilizem essa parceria.
- Avaliar a eficiência na cogeração de energia das indústrias de celulose e quantificar o ganho na comercialização de bioeletricidade para a indústria de celulose como um novo negócio que incentive as plantas mais antigas a implementar novos parques produtivos.
- Levantar a área de expansão de eucalipto, visando detectar se houve mudanças na vegetação nativa, nas áreas de pastagens ou quais eram as atividades anteriores e estudar a dinâmica entre as atividades que deixaram de existir com o plantio de eucalipto e com as instalações das indústrias de celulose.
- Avaliar os fatores do *trade off* do crescimento econômico com a implantação das indústrias de celulose com as externalidades positivas e negativas aos municípios onde as indústrias atuam. Importante salientar a necessidade de banco de dados com séries históricas para uma melhor compreensão.

Em suma, os resultados apontam claramente para uma oportunidade significativa na aplicação do modelo DEA. A avaliação da pós-eficiência ajudou a traduzir as informações em dados relevantes para tomada de decisões. Embora identificar políticas específicas esteja fora do escopo desta pesquisa, é razoável considerar sistemas de incentivos para promover a introdução tecnologias modernas nas indústrias com processos produtivos defasados, bem como impulsionar, de maneira eficiente, a geração e a cogeração de bioeletricidade.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF, ANUÁRIO ESTATÍSTICO (2012). **Ano base 2012**. Brasília: Abraf, 2013. Disponível em: <[http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13\\_BR.pdf](http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf)> Acesso em: dez. 2016.
- ADIB, R., MURDOCK, H. E., APPAVOU, F., BROWN, A., EPP, B., LEIDREITER, A., e FARRELL, T. C. (2015). **Renewables 2015 global status report**. Paris: REN21 Secretariat.
- ADLER, N., e GOLANY, B. (2001). Evaluation of deregulated airline networks using data envelopment analysis combined with principal component analysis with an application to Western Europe. **European Journal of Operational Research**, 132(2), pp. 260-273.
- ADLER, N., e VOLTA, N. (2016). Accounting for externalities and disposability: a directional economic environmental distance function. **European Journal of Operational Research**, 250(1), pp. 314-327.
- ADLER, N., FRIEDMAN, L., e SINUANY-STERN, Z. (2002). Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. **European journal of operational research**, 140(2), pp. 249-265.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono – Caderno 2: nota técnica papel e celulose. 2012. Disponível em: <[https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/18520/GVces\\_Nota%20%C3%A9cnica%20papel\\_celulose.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/18520/GVces_Nota%20%C3%A9cnica%20papel_celulose.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 20 de dezembro. 2017.
- AFRIAT, S. N. (1972). Efficiency estimation of production functions. **International Economic Review**, 13(3), pp. 568-598.
- AMADO, N. B. (2007). **Energia e desenvolvimento capitalista: o debate em torno das políticas de eficientização**. Tese de doutorado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ANDRADE, R. (2018). Fábricas de papel e de celulose: um estudo sobre as consequências ambientais, sociais e educacionais na cidade de Três Lagoas/MS. **Revista Trabalho Necessário**, 8(11).
- ANEEL (2016). **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: dez. 2016.
- ANEEL (2017). **CEG - Código Único de Empreendimentos de Geração**. Disponível em <[http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset\\_publisher/mJhnKli7qcJG/content/lorem-ips-1/655808?inheritRedirect](http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/lorem-ips-1/655808?inheritRedirect)> Acesso em: dez. 2017.
- ANEEL, C. T. (2014). **Micro e Minigeração Distribuída**. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: dez. 2018.

- ANGULO-MEZA, L., e LINS, M. P. E. (2002). Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**, 116(1-4), pp. 225-242.
- ANTONELLI, C. (2014). **The economics of innovation, new technologies and structural change**. Londres: Routledge.
- ASSIS, T. F. de ABAD, J. I. M., e AGUIAR, A. M. (2016). Melhoramento genético do eucalipto. In: SCHUMACHER, M. V. e VIEIRA, M. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**, Santa Maria/RS: Editora UFSM, pp. 225–248.
- ASSIS, T. F. de. (2006). Os propulsores da produtividade dos eucaliptos. **Revista Opiniões**, 14. Disponível em <<http://www.expoforest.com.br/silvicultura/wp-content/uploads/2013/09/encontro-silvicultura-2014-bloco-2-pdf-artigo-pag-127.pdf>>. Acesso em jan. 2019.
- BABBIE, E. (1999). **Métodos de pesquisas de survey** (Vol. 1). Belo Horizonte: Editora UFMG.
- BAJAY, S. V., e SANTANA, P. D. M. (2010). **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: experiências internacionais em eficiência energética para a indústria**. Brasília: CNI, pp. 78-80.
- BAJPAI, P. (2013). **Biorefinery in the pulp and paper industry**. Oxford: Elsevier.
- BARBELI, M. C. (2015). Indústria de papel e celulose: estado da arte das tecnologias de cogeração de energia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, 3(3), pp. 107-122.
- BARNUM, D. T., e GLEASON, J. M. (2008). Bias and precision in the DEA two-stage method. **Applied Economics**, 40(18), pp. 2305-2311.
- BARNUM, D., e GLEASON, J. (2008). **Measuring the efficiency of electricity generating plants with fixed proportion technology indicators**. UIC College of Business Administration Research Paper n° 08-12. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=1319761>> ou <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1319761>>. Acesso em: mar. 2015.
- BATOR, F. M. (1958). The anatomy of market failure. **The quarterly journal of economics**, 72(3), pp. 351-379. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/1882231>>. Acesso em mar. 2015.
- BAUMOL, W. J., e OATES, W. E. (1975). **The Theory of Environmental Policy: externalities, public outlays, and the quality of life**. Nova Iorque: Cambridge Press, pp. 10-13.
- BAUMOL, W. J., OATES, W. E., BAWA, V. S. e BRADFORD, D. F. (1988). **The theory of environmental policy**. Nova Iorque: Cambridge University Press.
- BERGEK, A., JACOBSSON, S., e SANDÉN, B. A. (2008). Legitimation and development of positive externalities: two key processes in the formation phase of technological innovation systems. **Technology Analysis e Strategic Management**, 20(5), pp. 575-592.



- BERGER, L. T., e KRZYSZTOF, I. (2015). **Redes Elétricas Inteligentes: aplicações, comunicação e segurança**. Rio de Janeiro: LTC.
- BERNI, M. D., e BAJAY, S. V. (2012). Eficiência energética e oportunidades para as biorrefinarias na indústria brasileira de celulose e papel. **The 45th ABTCP International Pulp and Paper Congress**, out., Sao Paulo, pp. 9–11.
- BERNI, M. D., BAJAY, S. V., e GORLA, F. D. (2010). **Oportunidades de eficiência energética na indústria: relatório setorial do setor cerâmico**. Brasília: CNI.
- BERNI, Mauro Donizeti; BAJAY, Sérgio Valdir; GORLA, Felipe D. (2011). **Guia técnico: eficiência energética na indústria de celulose e papel, mecanismos de incentivo à eficiência energética para economia de baixo carbono**. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), Confederação Nacional da Indústria (CNI), Eletrobrás/PROCEL.
- BLAZUS, A., HORA, A., e LEITE, B. (2010). O potencial de investimento nos setores florestal, de celulose e de papel. **Perspectivas do investimento**, pp. 108-143. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1261>>. Acesso em: nov. 2016.
- BLOMBERG, J., HENRIKSSON, E., e LUNDMARK, R. (2012). Energy efficiency and policy in Swedish pulp and paper mills: a data envelopment analysis approach. **Energy Policy**, 42, pp. 569-579.
- BNDES (2014). **Banco Nacional do Desenvolvimento**. <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home>>. Acesso em mai. 2015.
- BOGETOFT, P., e OTTO, L. (2010). **Benchmarking with DEA, SFA, and R**. Nova Iorque: Springer Science e Business Media.
- BOUSSOFIANE, A., DYSON, R. G., e THANASSOULIS, E. (1991). Applied data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, 52(1), pp. 1-15.
- BOWLIN, W. F. (1998). Measuring performance: An introduction to data envelopment analysis (DEA). **The Journal of Cost Analysis**, 15(2), pp. 3-27.
- BOZARTH, C. C., e HANDFIELD, R. B. (2013). **Introduction to operations and supply chain management**. Upper Saddle River: Prentice-Hall.
- BRACELPA (2014a). **Dados - Setor de Celulose e Papel**. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA).
- BRACELPA (2014b). **Conjuntura BRACELPA 64**. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA).
- BRACELPA, E. (2014c). **Relatório Anual**. São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA).
- BRACELPA (2012). **Dados do Setor**, junho de 2012. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/estatisticas>>. Acesso em mar. 2015.

- BRUE, L. S. (2006). **História do pensamento econômico**. São Paulo: Thomson Learning.
- BUDZIANOWSKI, W. M. (2017). High-value low-volume bioproducts coupled to bioenergies with potential to enhance business development of sustainable biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 70, pp. 793-804.
- BURSZTYN, M. A. A. (1994). **Gestão ambiental: instrumentos e práticas**. Brasília: IBAMA.
- CÁNEPA, E. M. (2003). **Economia da poluição, economia do meio ambiente: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, pp. 61-79.
- CAPELLO, R. (2015). **Regional economics**. Londres: Routledge.
- CARLUCCI, F. V. (2012). **Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.
- CARVALHO, K. D., COSTA, C. D. M., SOARES, N. S., e SILVA, M. D. (2010). Desempenho das exportações brasileiras de papel. **Scientia Forestalis**, 38(86), pp. 263-271.
- CASTRO, N. J., BRANDÃO, R., e DANTAS, G. D. A. (2010). **O potencial da bioeletricidade, a dinâmica do setor sucroenergético e o custo estimado dos investimentos**. GESEL, Grupo de Estudos do Setor Elétrico–UFRJ, Rio de Janeiro.
- CAVALCANTI, M. C. B. (2011). **Tributação relativa etanol-gasolina no Brasil: competitividade dos combustíveis, arrecadação do estado e internalização de custos de carbono**. Tese de Doutorado. COPPE – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CAVES, R. E. (1989). Mergers, takeovers, and economic efficiency: foresight vs. hindsight. **International Journal of Industrial Organization**, 7(1), pp. 151-174.
- CENBIO (2015). **Centro Nacional de Referência em Biomassa**. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/>> Acesso em: mar. 2015.
- CHAABOUNI, S. (2018). **China's regional tourism efficiency: A two-stage double bootstrap data envelopment analysis**. *Journal of Destination Marketing e Management*. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212571X17303074?via%3Dihub>> Acesso em: jan. 2019.
- CHANDRA, J. P. e YADAVA, M. P. S. (1986). Clonal propagation of Mysore gum (Eucalyptus hybrid). **Indian Forester**, 112, p. 783.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., e RHODES, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. **European journal of operational research**, 2(6), pp. 429-444.

- CHIRAT, C., LACHENAL, D., e DUFRESNE, A. (2010). Biorefinery in a kraft pulp mill: from bioethanol to cellulose nanocrystals. **Cellulose Chemistry and Technology**, 44, American Chemical Society (ACS), pp. 59–64.
- CNI (2010). **Novas tecnologias para processos industriais**: Eficiência energética na indústria, relatório técnico, convênio entre a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Eletrobrás/Procel. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2012/9/eficiencia-energetica-na-industria/>> Acesso em: ago. 2015.
- COASE, R. H. (1960). **The problem of social cost**. Classic papers in natural resource economics. Londres: Palgrave Macmillan, pp. 87-137.
- COELHO, S. T. (1999). **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa**: Um modelo para Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-graduação em energia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- COELLI, T. J., RAO, D. S. P., O'DONNELL, C. J., e BATTESE, G. E. (2005). **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Nova Iorque: Springer Science e Business Media.
- COP21 (2015). **Conferência das Partes**. Disponível em <<http://www.cop21paris.org>>. Acesso em: mar.2016.
- CONSOLI, D. (2008). Systems of innovation and industry evolution: The case of retail banking in the UK. **Industry and Innovation**, 15(6), pp. 579-600.
- COOK, W. D., e SEIFORD, L. M. (2009). Data envelopment analysis (DEA): Thirty years on. **European journal of operational research**, 192(1), pp. 1-17.
- COOPER, D. R., e SCHINDLER, P. S. (2003). **Business research methods**. Nova Iorque: McGrawHill.
- COOPER, D. R., e SCHINDLER, P. S. (2016). **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: McGraw Hill Brasil/Saraiva.
- COOPER, W. W.; SEAFORD, L. M.; TONE, K. (2000). **Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text with Models, Applications, Reference and DEA – Solver software**. Noruega: Kluwer Academic Publishers.
- COOPER, W. W., SEIFORD, L. M., e TONE, K. (2006). **Introduction to data envelopment analysis and its uses**: with DEA-solver software and references. Nova Iorque: Springer Science e Business Media.
- COOPER, W. W., SEIFORD, L. M., e ZHU, J. (2004). **Data envelopment analysis**. Handbook on data envelopment analysis. Boston: Springer, pp. 1-39.
- COOPER, W. W., SEIFORD, L. M., TONE, K., e ZHU, J. (2007). Some models and measures for evaluating performances with DEA: past accomplishments and future prospects. **Journal of Productivity Analysis**, 28(3), pp. 151-163.

- DA SILVEIRA, J. Q., e MEZA, L. A. (2012). Identificação de benchmarks e anti-benchmarks para companhias aéreas usando modelos DEA e fronteira invertida. **Production**, 22(4), pp. 788–795.
- DANDRES, T., GAUDREAU, C., TIRADO-SECO, P., e SAMSON, R. (2012). Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005-2025 European Union bioenergy policy using the gtap model and life cycle assessment. **Renewable and sustainable energy reviews**, 16(2), pp. 1180–1192. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.003>>. Acesso em jan. 2019.
- DASAPPA, S. (2011). Potential of biomass energy for electricity generation in sub Saharan Africa. **Energy for Sustainable Development**, 15(3), pp. 203–213. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.07.006>>. Acesso em jan. 2019.
- DE ASSIS, T. F. (2014). **Melhoramento genético de Eucalyptus: desafios e perspectivas**. 3º Encontro Brasileiro de Silvicultura, Campinas. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/311453642\\_Melhoramento\\_genetico\\_de\\_Eucalyptus\\_desafios\\_e\\_perspectivas](https://www.researchgate.net/publication/311453642_Melhoramento_genetico_de_Eucalyptus_desafios_e_perspectivas)> Acesso em: jan. 2019.
- DE ASSIS, T. F., ABAD, J. I. M., e AGUIAR, A. M. (1996). Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, 18, pp. 32-51.
- DE MELO, E. B., BOENTE, D. R., e MÓL, A. L. R. (2014). Avaliação econômico-financeira das companhias integrantes do IGC-BMeFBovespa sob a ótica da análise envoltória de dados. **Revista Ambiente Contábil**, 6(2), pp. 189-219.
- DEBREU, G. (1951). The coefficient of resource utilization. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, 19(3), pp. 273-292.
- DEL GRANDE, M. H. (2004). **Racionalização do uso de água na indústria de celulose: o caso Bahia**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologias. Ambientais no Processo Produtivo da Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- DESPOSTIS, D. K. (2005). A reassessment of the human development index via data envelopment analysis. **Journal of the Operational Research Society**, 56(8), pp. 969–980.
- DIAS, M. V. X., BORTONI, E. D. C., e HADDAD, J. (2016). **Geração Distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético Brasília. Disponível em: <<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/215-Texto%20do%20artigo-196-1-10-20180308.pdf>> Acesso em: jan. 2016.
- DIAS, R. (2011). **Gestão Ambiental: Responsabilidade Social e Sustentabilidade**. São Paulo: Atlas.
- DOGAN, N. O., e TUGCU, C. T. (2014). Energy efficiency in electricity production: A data envelopment analysis (DEA) approach for the G-20 countries. **International Journal of Energy Economics and Policy**, 5(1), pp. 246-252.

- DOS SANTOS, J. O., DE SOUSA SANTOS, R. M., DE ALBUQUERQUE FERNANDES, A., DA SILVA SOUSO, J., BORGES, M. D. G. B., FERREIRA, R. T. F. V., e SALGADO, A. B. (2013). Os Impactos produzidos pelas mudanças climáticas. **Agropecuária Científica no Semiárido**, 9(1), pp. 9-16.
- DYSON, R. G., ALLEN, R., CAMANHO, A. S., PODINOVSKI, V. V., SARRICO, C. S., e SHALE, E. A. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of operational research**, 132(2), pp. 245-259.
- DYSON, R. G., ALLEN, R., CAMANHO, A. S., PODINOVSKI, V. V., SARRICO, C. S., AND SHALE, E. A. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, 132, pp. 245–325.
- EATON, B.C.; EATON, F.D. (1999). **Microeconomia**. São Paulo: Saraiva.
- EMROUZNEJAD, A. (2005). Measurement efficiency and productivity in SAS/OR. **Computers e operations research**, 32(7), pp. 1665-1683.
- EMROUZNEJAD, A., e YANG, G. L. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. **Socio-Economic Planning Sciences**, 61, pp. 4-8.
- ENTANI, T., MAEDA, Y., e TANAKA, H. (2002). Dual models of interval DEA and its extension to interval data. **European Journal of Operational Research**, 136(1), pp. 32-45.
- FAGERBERG, J. (1994). Technology and international differences in growth rates. **Journal of economic Literature**, 32(3), pp. 1147-1175.
- FAGUNDES, M. B. B.; SCHMIDT, V. (2011). Competitividade do SAG da silvicultura no Mato Grosso do Sul: um enfoque sobre as florestas plantadas de eucalipto. **Revista de Economia e Agronegócios**, 9(2), pp. 253-274.
- FAIS, V. von B. (2015). **Modelling policy instruments in energy system models: the example of renewable electricity generation in Germany**. Disponível em: <[http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/2376/1/FB\\_121\\_Fais.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/2376/1/FB_121_Fais.pdf)>. Acesso em: jan. 2019.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2014). **The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/docs/FAO\\_nexus\\_concept.pdf](http://www.fao.org/nr/water/docs/FAO_nexus_concept.pdf)> Acesso em: dez. 2016.
- FAO. (2016). **Incentivos gera redução de desmatamento no Brasil**. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/426091/>> Acesso em: ago. 2016.
- FÄRE, R., GROSSKOPF, S., LUNDGREN, T., MARKLUND, P. O., e WENCHAO, Z. (2013). **Which bad is worst?: An application of Johansen's capacity model**. Disponível em: <[http://docs.business.auckland.ac.nz/Doc/Paper-2\\_Fare.pdf](http://docs.business.auckland.ac.nz/Doc/Paper-2_Fare.pdf)> Acesso em: dez. 2016.
- FARINACI, J. S., e DE ESTUDOS, P. C. D. N. (2012). **Contribuição da modernização ecológica para discussões acerca da transição florestal: o caso das monoculturas**

- florestais. Encontro da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, Belém.
- FARRELL, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**. series A (general), 120(3), pp. 253-290.
- FEARON, D. (2002). **Alfred Weber: Theory of the Location of Industries**, 1909. Califórnia: CSISS Classics.
- FISCHER, A., e ZYLBERSZTAJN, D. (2012). O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. **READ**. Revista Eletrônica de Administração, Porto Alegre, 18(2), pp. 494–520. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-23112012000200008>>. Acesso em jan. 2019.
- FOELKEL, C. (2007). As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para a fabricação de papel. **Eucalyptus Online Book e Newsletter**, 79. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03\\_fibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03_fibras.pdf)> Acesso em: jan. 2019.
- FONSECA, R.C.Z. da. (2004). **O PVC e a Sustentabilidade Ambiental: marcos históricos e o caso Amanco Brasil**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- FONSECA, S. M. D. F. (2010). **Manual prático de melhoramento genético de eucalipto**. Viçosa: Editora da UFV.
- FORTUNATTO, A. C. (2014). **Alternativas para o aproveitamento do licor negro da indústria de papel e celulose**. Monografia de Curso de Especialização. Programa de Pós-graduação em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FRANCIS, D. W., TOWERS, M. T., e BROWNE, T. C. (2002). **Energy cost reduction in the pulp and paper industry**. Montreal: Pulp and Paper Research Institute of Canada.
- FRIED, H. O., LOVELL, C. K., SCHMIDT, S. S., e YAISAWARNG, S. (2002). Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. **Journal of productivity Analysis**, 17(1-2), pp. 157-174.
- FSC - Forest Stewardship Council (2015). **Sobre o FSC Brasil**. Disponível em: <<https://br.fsc.org/fsc-brasil.175.htm>>. Acesso em: jun. 2015.
- FURTADO, R. C. (1996). **The incorporation of environmental costs into power system planning in Brazil**. Tese de doutorado. Centre for Environmental Technology. Imperial College of Science, Technology and Medicine of London, University of London, Londres.
- GAO, J., e YOU, F. (2015). Sustainable design and operation of shale gas supply chain networks with life cycle economic and environmental optimisation. In: **Chemical Engineering Transactions**. Roma: Italian Association of Chemical Engineering-AIDIC.
- GAVIÃO, L. O., BARRETO, M., LIMA, G. B. A., MEZA, L. A., SOUZA, D. O. G., e VIEIRA, T. G. (2017). Avaliação de eficiência a partir de indicadores de sustentabilidade. **Conhecimento e Diversidade**, 8(16), pp. 68-83.



- GAVRILESCU, M. (2014). Biorefinery systems: an overview. In: **Bioenergy Research: Advances and Applications**, pp. 219-241. Oxford: Elsevier
- GELLER, H. S., BARBOSA, M. V., e SCHULER, M. E. (2003). **Revolução energética: políticos para um futuro sustentável**. Rio de Janeiro: Relume Dumará.
- GERENT, J. (2006). Internalização das externalidades negativas ambientais: uma breve análise da relação jurídico-econômica. **Revista de Direito Ambiental**, 44(11), pp. 40-63.
- GHOBIADIAN, A., e HUSBAND, T. (1990). Measuring total productivity using production functions. **The international journal of production research**, 28(8), pp. 1435-1446.
- GOLANY, B., e ROLL, Y. (1989). An application procedure for DEA. **Omega**, 17(3), pp. 237-250.
- GOLDEMBERG, J. (1998). Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, 12(33), pp. 7-15.
- GOMES, E. G., ABREU, U. G. P. D., MELLO, J. C. C. B. S., CARVALHO, T. B. D., e ZEN, S. D. (2012). Unitary input DEA model to identify beef cattle production systems typologies. **Pesquisa Operacional**, 32(2), pp. 389-406.
- GOMES, F. A. (2009). **Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids® para madeira de Pinus taeda**. Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GONZALEZ-SALAZAR, M. A., MORINI, M., PINELLI, M., SPINA, P. R., VENTURINI, M., FINKENRATH, M., e POGANIETZ, W. R. (2014). Methodology for biomass energy potential estimation: Projections of future potential in Colombia. **Renewable Energy**, 69, pp. 488-505.
- GOWREESUNKER, B. L., e TASSOU, S. A. (2015). Approaches for modelling the energy flow in food chains. **Energy, Sustainability and Society**, 5(1). Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13705-015-0035-y>>. Acesso em: jan. 2019
- GREGORIOU, G. N., SEDZRO, K., e ZHU, J. (2005). Hedge fund performance appraisal using data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, 164(2), pp. 555-571.
- GUTIÉRREZ-POCH, M. (2012). **Is There a Southern European Model?** Development of the Pulp and Paper Industry in Italy, Spain and Portugal (1800–2010). The Evolution of Global Paper Industry 1800-2050. Holanda: Springer, pp. 211-242.
- HARLAFTIS, G., VALDALISO, J., e TENOLD, S. (2012). **The world's key industry: history and economics of international shipping**. Nova Iorque: Palgrave Macmillan.
- HAWDON, D. (2003). Efficiency, performance and regulation of the international gas industry: a bootstrap DEA approach. **Energy Policy**, 31(11), pp. 1167-1178.
- HELLER, W. P., e STARRETT, D. A. (1976). On the nature of externalities. In: SAY, L. **Theory and measurement of externalities**. Nova Iorque: Academic Press, pp. 9-22.

- HOHMEYER, O. (1988). **Social costs of energy consumption**. a Report prepared under contract for the Commission of the European Communities. Berlin: Springer Verlag.
- HOSSEINZADEH, A., SMYTH, R., VALADKHANI, A., e LE, V. (2016). Analyzing the efficiency performance of major Australian mining companies using bootstrap data envelopment analysis. **Economic Modelling**, 57, pp. 26-35.
- HU, J. L., e KAO, C. H. (2007). Efficient energy-saving targets for APEC economies. **Energy policy**, 35(1), pp. 373-382.
- IBA (2015). **Indústria Brasileira de Árvores**. Disponível em: <<http://www.iba.org/pt/>> Acesso em: mai. 2015.
- IBA (2016). **Cenários Ibá**. [Brasília], n. 27, ago. 2016. Disponível em: <<http://iba.org/pt/dados-e-estatisticas/cenarios-iba>>. Acesso em: set 2016.
- IBA (2016). **Indústria Brasileira de Árvores, 2016**. Brazilian Tree Industry 2016: a report of the Brazilian Tree Industry, Brasilia. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2016.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2016.pdf)>. Acesso em: dez. 2016.
- IBA (2017). **Indústria Brasileira de Árvores, 2017**. Brazilian Tree Industry 2017: a report of the Brazilian Tree Industry, Brasilia. Disponível em: <[http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2017.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2017.pdf)>. Acesso em: nov. 2017.
- IBGE (2016). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)> Acesso em: fev. 2016.
- IEA (2016). **Internacional Energy Agency**. <<https://www.eia.gov/outlooks>>. Acesso em: mai. 2016.
- INMETRO (2012). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Avaliação da conformidade**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/qualidade/cerflor.asp>>. Acesso em: jun. 2015.
- ISARD, W. (1956). **Location and space-economy**. Flórida: University of Florida Libraries.
- JANNUZZI, G. D. M. (2002). Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil. **Sustentabilidade na Geração e o Uso da Energia no Brasil: os próximos 20 anos**, 35. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/unicamp-20anos.pdf>> Acesso em: jan. 2019.
- JANNUZZI, G. D. M. (2014). Energia e Meio ambiente. **Com Ciência**: Revista eletrônica de Jornalismo Científico. Disponível em: <<http://www.comciencia.br>>. Acesso em: ago. 2018.
- JANNUZZI, G. DE M., e DE MELO, C. A. (2013). Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030. **Energy for Sustainable Development**, 17(1), pp. 40–46. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.010>>. Acesso em: jan. 2019.



- JEBALI, E., ESSID, H., e KHRAIEF, N. (2017). The analysis of energy efficiency of the Mediterranean countries: A two-stage double bootstrap DEA approach. **Energy**, 134, pp. 991-1000.
- JUNIOR, A. P. S., BONACIM, C. A. G., e JUNIOR, A. C. P. (2011). Aplicação da análise envoltória de dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste do estado de São Paulo. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, 11(3), pp. 826-843.
- JÚNIOR, P., e BAPTISTA, V. (2001). **Alternativas para a cogeração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônomas da Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.
- KASSAI, S. (2002). **Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na análise de demonstrações contábeis**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Contabilidade e Controladoria da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- KAYGUSUZ, K. (2012). Energy for sustainable development: A case of developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(2), pp. 1116-1126
- KEMMLER, A., e SPRENG, D. (2007). Energy indicators for tracking sustainability in developing countries. **Energy Policy**, 35(4), pp. 2466-2480.
- KINCAID, J. (1998). **North American Pulp e Paper Fact Book**. São Francisco: Miller Freeman Publications.
- KLIKSBERG, B. (2001) Dez falácias sobre os problemas sociais da América latina. In: \_\_\_\_\_ **Falácias e Mitos do Desenvolvimento Social**. São Paulo: Cortez. Editora/UNESCO.
- KOOPMANS, T. C. (1951). An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities. In: **Activity Analysis of Production and Allocation**. Cowles Commission for Research in Economics, Monograph 13. Nova Iorque: John-Wiley and Sons, Inc.
- KRAMER, K. J., MASANET, E., e XU, T. (2009). **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry: an ENERGY STAR ® Guide for Energy and Plant Managers**. s/d.
- KUMBHAKAR, S. C., e LOVELL, C. K. (2003). **Stochastic frontier analysis**. Nova Iorque: Cambridge University Press.
- LÁBAJ, M., LUPTÁČIK, M., NEŽINSKÝ, E. (2014). Data envelopment analysis for measuring economic growth in terms of welfare beyond GDP. **Empirica**, 41(3), pp. 407-424.
- LAFFONT, J. J. (1975). Macroeconomic constraints, economic efficiency and ethics: An introduction to Kantian economics. **Economica**, 42(168), pp. 430-437.
- LAFFONT, J. J., e TIROLE, J. (1988). The dynamics of incentive contracts. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, pp. 1153-1175.

- LAFFONT, J. J., e TIROLE, J. (1990). The regulation of multiproduct firms: Part I: Theory. **Journal of Public Economics**, 43(1), pp. 1-36.
- LAFFONT, J.-J., 1987. Externalities. In: EATWELL, J. M.; MILGATE, M.; NEWMAN, P., **A Dictionary of Economics**, Londres: Macmillan.
- LEITE, A. M. P. (2002) **Análise da terceirização na colheita florestal no Brasil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência Floresta da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- LEITE, P. R. (2009). **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. Nova Iorque: Pearson Prentice Hall.
- LEMONS, P. F. I (2008). **Meio ambiente e responsabilidade civil do proprietário**. São Paulo: Revista dos Tribunais.
- LETA, Fabiana Rodrigues *et al* (2005). Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos. **Investigação Operacional**, v. 25, n. 2, pp. 229-242.
- LI, N., e TOPPINEN, A. (2011). Corporate responsibility and sustainable competitive advantage in forest-based industry: Complementary or conflicting goals? **Forest Policy and Economics**, 13(2), pp. 113-123.
- LIMA-TOIVANEN, M. B. (2012). **The South American Pulp and Paper Industry: The Cases Brazil, Chile, and Uruguay**. In the Evolution of Global Paper Industry 1800-2050. Holanda: Springer, pp. 243-283.
- LIMA, W. D. P. (1993). **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EdUSP.
- LINS, M. P. E., e MEZA, L. A. (2000). **Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente de apoio à decisão**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ.
- LIU, F., e ELIAS, R. (2003). Suitability of Acacia Pulp for Wood Free Coating Base Papers. **57th Appita Annual Conference and Exhibition**, Melbourne, Australia 5-7 May 2003, p. 69.
- LONGO, C. A., e TROSTER, R. L. (1993). **Economia do setor público**. São Paulo: Atlas.
- LOVELL, C. K. (1996). Applying efficiency measurement techniques to the measurement of productivity change. **Journal of Productivity Analysis**, 7(2-3), pp. 329-340.
- MALERBA, F., e ORSENIGO, L. (1996). The dynamics and evolution of industries. **Industrial and Corporate change**, 5(1), pp. 51-87.
- MANKIW, Gregory. (2006). **Introdução à Economia**. São Paulo: Thomson Learning, pp. 210-211.
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2012). **Projeções do Agronegócio 2011/2012 a 2021/2022**. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/Projecoes%20](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/Projecoes%20)

- do %20Agronegocio%20Brasil%202011-20012%20a%202021-2022%20(2)(1).pdf>  
Acesso em: jun. 2015.
- MARCOVITCH, J. (2006). **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais**. São Paulo: EdUSP.
- MARCOVITCH, J. (2012). **Certificação e sustentabilidade ambiental: uma análise crítica**. Disponível em: <[http://www.usp.br/mudarfuturo/cms/wp-content/uploads/Certificação-e-Sustentabilidade-Ambiental-Trabalho-Final\\_261012.pdf#page=13](http://www.usp.br/mudarfuturo/cms/wp-content/uploads/Certificação-e-Sustentabilidade-Ambiental-Trabalho-Final_261012.pdf#page=13)>. Acesso em: jan. 2019.
- MARIANO, E. B., e REBELATTO, D. A. D. N. (2014). Transformation of wealth produced into quality of life: analysis of the social efficiency of nation-states with the DEA's triple index approach. **Journal of the Operational Research Society**, 65(11), pp. 1664-1681.
- MARKOWITZ, H. (1959). **Portfolio Selection, Cowles Foundation Monograph No. 16**. John Wiley, New York.
- MOSS, S (1981). **An Economic theory of Business Strategy**. Nova Iorque: Halstead Press.
- MARKOWITZ, H. M. (1968). **Portfolio selection: efficient diversification of investments**. New Haven: Yale university press.
- MARQUES, M. I. M. (2016). Considerações sobre a expansão da indústria de papel e celulose no Brasil a partir do caso da Suzano Papel e Celulose. **GEOgraphia**, 17(35), pp. 120-147.
- MARTINS, F. R. S., e KAMIMURA, Q. P. (2012). **Análise da ocupação do espaço territorial do município de Imperatriz-MA**. The 4th International Congress University Industry Cooperation, Taubaté. Disponível em: <<http://www.unitau.br/unindu/artigos/pdf515.pdf>>. Acesso em: dez. 2017
- MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass: conversion technologies. **Bioresource technology**, 83(1), pp. 47-54.
- MEJIA, C. S. (2015). **Boas práticas e inovações tecnológicas visando ganhos de eficiência energética em alguns segmentos industriais energo intensivos**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MELLO, J. C. C. B. S., GOMES, E. G., MEZA, L. A., e LETA, F. R. (2008). DEA advanced models for geometric evaluation of used lathes. **WSEAS Transactions on Systems**, 7(5), pp. 510-520.
- MENKES, M. (2004). **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. Brasília: UnB.
- MEZA, L. A., BIONDI NETO, L., MELLO, J. C. C. B. S., e GOMES, E. G. (2005). ISYDS-Integrated System for Decision Support (SIAD-Sistema Integrado de Apoio à Decisão): a software package for data envelopment analysis model. **Pesquisa Operacional**, 25(3), pp. 493-503.

- MICHOPOULOS, A., SKOULOU, V., VOULGARI, V., TSIKALOUDAKI, A., e KYRIAKIS, N. A. (2014). The exploitation of biomass for building space heating in Greece: energy, environmental and economic considerations. **Energy Conversion and Management**, 78, pp. 276-285.
- MIELI, j. C. A. (2007) **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MILARÉ, É. D. I. S. (2011). **Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco**. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais.
- MIRANDA, M. da. (2012). **Avaliação Técnico-Econômica Do Branqueamento Pelas Sequências D (Epo)D E A/D(Epo) Dp**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.
- MISHAN, E. J. (1971). The postwar literature on externalities: an interpretative essay. **Journal of economic literature**, 9(1), pp. 1-28.
- MMA (2015) - Ministério do Meio Ambiente. **Eficiência Energética e conservação de energia**. Brasília, 21 abr. 2015. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Eficiência+Energética+\(PDF\)/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Eficiência+Energética+(PDF)/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1)>. Acesso em: ago. 2017.
- MOCHÓN, F. M. (2002). **Introdução à Economia**. São Paulo: Pearson/Makron Books.
- MOLL, S. (2016). **Cultura organizacional e externalidades no território: o caso da empresa celulose Irani SA-SC-Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional da Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul.
- MONTEBELLO, A. E. S., e BACHA, C. J. C. (2013). Impactos da reestruturação do setor de celulose e papel no Brasil sobre o desempenho de suas indústrias. **Estudos Econômicos**, 43(1), pp. 109–137. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-41612013000100005>>. Acesso em: jan. 2019
- MOSES, L. N. (1958). Location and the theory of production. **The Quarterly Journal of Economics**, 72(2), pp. 259-272.
- MOURA, L. A. A. (2002). **Qualidade e gestão ambiental: sugestões para implantação das normas ISO 14.000 nas empresas**. São Paulo: Juarez de Oliveira,
- MÜLLER, M. D. (2005). **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- NASCIMENTO DOS SANTOS, R. B. (2011). Eficiência técnica na indústria de base florestal brasileira via metas intermediárias. **Revista Árvore**, 35(6), pp. 1319-1326.

- NASSIRI, S. M., e SINGH, S. (2009). Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique. **Applied Energy**, 86(7-8), pp. 1320-1325.
- TH Naylor (1966). The theory of the firm: a comparison of marginal analysis and linear programming. **Southern Economic Journal**. 32(jan), pp. 263-274.
- NOGUEIRA, J. M., DE MEDEIROS, M. A. A., e DE ARRUDA, F. S. T. (2000). Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empiricismo? **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, 17(2), pp. 81-115.
- NORMAN, M., e STOKER, B. (1991). **Data envelopment analysis: the assessment of performance**. Nova Iorque: John-Wiley and Sons, Inc.
- NUSDEO, Fábio. (2015). **Curso de Economia: Introdução ao direito Econômico**. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais.
- OJALA, J., e LAMBERG, J.-A. (2013). Evolution of global paper and pulp industry 1800 – 2000: regional sources for competitiveness of clusters, **O Papel**, 74(10), pp. 51-54.
- OLIVEIRA, R. A. D. (2016). **Sustentabilidade e eficiência operacional de companhias abertas listadas na BMeFBovespa: um estudo a partir da análise envoltória de dados**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação da Escola e Gestão em Negócios da UNISINOS, São Leopoldo.
- OTT, W. (1997). **External costs and external price addings in the Swiss energy sector: Social Costs and Sustainability**. Berlin: Springer, pp. 176-183.
- OTTINGER, R., WOOLEY, D., ROBINSON, N., HODAS, D., e BABB, S. (1990). **Environmental Costs of Electricity**. Pace University Center for Environmental Legal Studies. Nova Iorque: Pace University Press.
- PADILHA, N. S. (2010). **Fundamentos constitucionais do direito ambiental brasileiro**. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus.
- PARKIN, M. (2010). **Economics**. Boston: Pearson.
- PEARCE, D., BANN, C., e GEORGIU, S. (1992). **The social cost of fuel cycles report to the UK Department of Trade and Industry**. Londres: CSERGE - University College London.
- PEFC - PROGRAMME FOR THE ENDORSEMENT OF FOREST CERTIFICATION SCHEMES (2015). **Sobre o PEFC Portugal**. Disponível em: <http://www.pefc.pt/about/sobre-o-pefc-portugal>>. Acesso em: jun. 2015.
- PEREIRA JÚNIOR, V. B (2001). **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- PIGOU, A. (1920). **The economics of welfare**. Versão online. Disponível em: <[http://files.libertyfund.org/files/1410/Pigou\\_0316.pdf](http://files.libertyfund.org/files/1410/Pigou_0316.pdf)>. Acesso em: jan. 2019.

- PIKETTY, Thomas. **O capital no século XXI**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.
- PINDYCK, R. S., e RUBINFELD, D. L. (2005). **Microeconomics**. Boston: Pearson.
- PINSONNEAULT, Alain; KRAEMER, Kenneth (1993). Survey research methodology in management information systems: an assessment. **Journal of management information systems**, 10(2), pp. 75-105.
- PINTO, J. H. Q., e ALMEIDA, E. F. (2007). **Economia da energia**: Fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Elsevier.
- PIOTTO, Z. C. (2003). **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel-Estudo de Caso**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PORTER, M. E. (1990). **The Competitive Advantage of Nations**. London: Macmillan.
- POYRY (2016). **Panorama setorial 2016-2017**. Disponível em: <[http://www.poyry.com.br/sites/www.poyry.com.br/files/media/related\\_material/16out27a-abtcp.pdf](http://www.poyry.com.br/sites/www.poyry.com.br/files/media/related_material/16out27a-abtcp.pdf)> Acesso em: jan. 2019
- RAGAUSKAS, A. J., NAGY, M., KIM, D. H., ECKERT, C. A., HALLETT, J. P., e LIOTTA, C. L. (2006). From wood to fuels: integrating biofuels and pulp production. **Industrial biotechnology**, 2(1), pp. 55-65.
- REDDY, B. S., e RAY, B. K. (2010). Decomposition of energy consumption and energy intensity in Indian manufacturing industries. **Energy for Sustainable Development**, 14(1), pp. 35-47.
- REIS, C., TALONE NETO, A., BRUNCKHORST, A., MOREIRA, J., PEREIRA, A., e MORAES, A. D. C. (2017). **Cenário do setor de florestas plantadas no Estado de Goiás**. Colombo/PR: Embrapa Florestas.
- REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. (2012). **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Manole.
- REVISTA **O Papel**. Disponível em: <[http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1379439674\\_a60196ef92c33b99485453959ceaa786\\_611508050.pdf](http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1379439674_a60196ef92c33b99485453959ceaa786_611508050.pdf)>. Acesso em: dez. 2016.
- REYNAUD, J. M. (2007). **As implicações dos programas de responsabilidade social da empresa Suzano Papel e Celulose no IDH-M da sua região de influência no estado da Bahia-Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- RIBEIRO, M. G. C., e DA SILVA MACEDO, M. A. (2010). **Desempenho multicriterial no setor brasileiro de distribuição de energia elétrica**: uma análise apoiada em DEA para os anos de 2007 e 2008. Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC. Disponível em: <<https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/794/794>>. Acesso em: jan. 2019.



- ROSANO-PENÑA, C., ALBUQUERQUE, P. H. M., e MARCIO, C. J. (2012). A eficiência dos gastos públicos em educação: evidências georreferenciadas nos municípios goianos. **Economia Aplicada**, 16(3), pp. 421-443.
- ROSSATO, F. G., HIDALGO, I. G. , SUSSAETA, A. , CASALE, F. , NAKAMITI, L. H. (2017). Economic Development and New Challenges: Biomass Energy and Sustainability'. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, **Energy and Power Engineering**, 11(5), p. 1142.
- ROSSATO, F. G. F., HIDALGO, I. G., DE CARVALHO, A. B., DIAS, S. M. A., e CASALE, F. (2016). Potencial energético oriundo da floresta plantada de eucalipto no estado do Mato Grosso do Sul: Uma análise comparativa. **Revista ESPACIOS**, 37(10), p. 1.
- ROSSATO, F. G. F., SUSAEATA, A., ADAMS, D. C., HIDALGO, I. G., DE ARAUJO, T. D., e DE QUEIROZ, A. (2018). Comparison of revealed comparative advantage indexes with application to trade tendencies of cellulose production from planted forests in Brazil, Canada, China, Sweden, Finland and the United States. **Forest Policy and Economics**, 97, pp. 59-66.
- ROTHERY, B. (1995). **ISO 14000 and. ISO 9000**. Londres: Gower Pub Co.
- ROWE, R., LANG, C, CHESTNUT, L., LATIMER, D., RAE, D., BERNOW, S., AND WHITE, D. (1995). **New York Electricity Externality Study**. Nova Iorque: Oceana Publications/Dobbs Ferry.
- SALGADO JUNIOR, A. P.; BONACIM, C. A. G.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C. (2009). Aplicação da análise envoltória de dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e álcool da região nordeste do estado São Paulo. *Organizações Rurais & Agroindustriais*, [S.l.], v. 11, p. 494–513.
- SACHS, I. (2004). **Desenvolvimento Inclemente, Sustentável, Sustentado**. Rio de Janeiro: Garamond/Sebrae.
- SCHLEISNER, L. AND NIELSEN, P.S. (1997). **External Costs related to Power Production Technologies Extern National Implementation for Denmark**, App.1, Ris0 National Laboratory. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/045/29045792.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/045/29045792.pdf)>. Acesso em: jan. 2019.
- SECEX. **Secretaria de Comércio Exterior**. Disponível em :<<http://www.brasilexport.gov.br>> Acesso em dez. de 2017.
- SEIBEL, S. (2003). **Decomposition Analysis of Carbon Dioxide Emission Changes in Germany-Conceptual Framework and Empirical Results**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, European Communities.
- SEIFORD, L. (2005). **A Cyber-Bibliography for Data Envelopment Analysis (1978-2005)**. Michigan: University of Michigan.
- SEIFORD, L. M. (1996). Data envelopment analysis: the evolution of the state of the art (1978–1995). **Journal of productivity analysis**, 7(2-3), pp. 99-137.

- SEIFORD, L. M., e ZHU, J. (1999). Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks. **Management science**, 45(9), pp. 1270-1288.
- SELVATTI, T. D. (2015). **Concentração da Produção e da Exportação Mundial de Celulose e de Medium Density Fiberboard (MDF)**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SENRA, L. F. A. D. C., NANJI, L. C., MELLO, J. C. C. B. S., e MEZA, L. A. (2007). **Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em DEA**. Pesquisa Operacional, 27(2), pp. 191-207.
- SGROI, F., DI TRAPANI, A. M., FODERÀ, M., TESTA, R., e TUDISCA, S. (2015). Economic assessment of Eucalyptus (spp.) for biomass production as alternative crop in Southern Italy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 44, pp. 614-619.
- SHEPHERD, W. G. (1970). **Market power and economic welfare: An introduction**. Nova Iorque: Random House.
- SHI, G. M., BI, J., e WANG, J. N. (2010). Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs. **Energy policy**, 38(10), pp. 6172-6179.
- SILVA MACEDO, M. A., e DE ALMEIDA, K. (2009). Análise do desempenho organizacional no agronegócio brasileiro: aplicando à agroindústria de papel e celulose. **Revista de Educação e Pesquisa em Contabilidade (REPeC)**, 3(1), pp. 25-45.
- SILVA SOARES, N., LOPES DA SILVA, M., e ARAUJO CORDEIRO, S. (2014). Produto interno bruto do setor florestal brasileiro, 1994 a 2008. **Revista Árvore**, 38(4), pp. 725-732.
- SIMAR, L. (1992). Estimating efficiencies from frontier models with panel data: a comparison of parametric, non-parametric and semi-parametric methods with bootstrapping. In **International Applications of Productivity and Efficiency Analysis**. Dordrecht: Springer, pp. 167-199.
- SIMAR, L., e WILSON, P. W. (2007). Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. **Journal of econometrics**, 136(1), pp. 31-64.
- SIMÕES, P., DE WITTE, K., e MARQUES, R. C. (2010). Regulatory structures and operational environment in the Portuguese waste sector. **Waste management**, 30(6), pp. 1130-1137.
- SINUANY-STERN, Z., e FRIEDMAN, L. (1998). DEA and the discriminant analysis of ratios for ranking units. **European Journal of Operational Research**, 111(3), pp. 470-478.
- SOCOL, F. J., VACCARI, R. F., e PEREIRA, A. L. (2015). Análise da utilização da geração distribuída frente à resolução normativa da Aneel nº 482/12. **Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE**, 1(1), pp.1-3.



- SONG, M. L., ZHANG, L. L., LIU, W., e FISHER, R. (2013). Bootstrap-DEA analysis of BRICS'energy efficiency based on small sample data. **Applied energy**, 112, pp. 1049-1055.
- SOUZA, E. D. (2009). **Inventário de emissões atmosféricas e avaliação de condicionantes meteorológicas: estudo de caso de Três Lagoas**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- STARRETT, D. A. (1988). **Foundations in Public Economics**. Nova Iorque: Cambridge University Press.
- STEPHAN, A., BADUNENKO, O., e FRITSCH, M. (2008). **What Drives the Productive Efficiency of a Firm?** The Importance of Industry, Location, ReD, and Size (No. 4). Centre for Innovation Systems, Entrepreneurship and Growth, Jönköping International Business School.
- SUSAETA, A., ADAMS, D. C., GONZALEZ-BENECKE, C., e SOTO, J. R. (2017). Economic Feasibility of Managing Loblolly Pine Forests for Water Production under Climate Change in the Southeastern United States. **Forests**, 8(3), p. 83.
- SUSAETA, A., ALAVALAPATI, J. R., e CARTER, D. R. (2009). Modeling impacts of bioenergy markets on nonindustrial private forest management in the southeastern United States. **Natural Resource Modeling**, 22(3), pp. 345-369.
- SWEENEY, J. L., e WEYANT, J. P. (1979). The energy modeling forum: past, present, and future. Energy policy: **The global challenge**, pp. 295-320.
- TACHIZAWA, Takeshy (2011). **Indicadores de gestão ambiental e de responsabilidade social**. Gestão ambiental e responsabilidade social corporativa: estratégias de negócios focadas na realidade brasileira. São Paulo: Atlas.
- TADEU, H. F. B.; SILVA, J. T. M.; CAMPOS, P. M. S. (2011). **Logística reversa e sustentabilidade**. São Paulo: Cengage Learning.
- TANAKA, Kanako (2011). Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. **Energy policy**, 39(10), pp. 6532-6550.
- TEIXEIRA, C. G. (2012). **Pagamento por serviços ambientais de proteção às nascentes como forma de sustentabilidade preservação ambiental**. Conselho da Justiça Federal, Brasília: Centro de Estudos Judiciários.
- TISOTT, S. T., SCHMIDT, V., e WAQUIL, P. D. (2017). Atividade florestal e o desenvolvimento socioeconômico em Três Lagoas e região: uma análise baseada na abordagem de cluster. **Desenvolvimento em questão: revista do programa de pós-graduação em desenvolvimento**, 15(38), pp. 228-260.
- TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo (2007). Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos-CEBRAP**, n. 79, pp. 47-69.

- TOLMASQUIM, Maurício Tiomno (2011). **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. São Paulo: Saraiva/Synergia.
- TSAI, W. H., LEE, H. L., YANG, C. H., e HUANG, C. C. (2016). Input-Output Analysis for Sustainability by Using DEA Method: A Comparison Study between European and Asian Countries. **Sustainability**, 8(12), p. 1230.
- US Report of the National Policy Development Group (2001). “Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency”. In: **Reliable affordable and environmentally sound energy for the American Future**. Washington, may, 2001. Disponível: <https://www.wtrg.com/EnergyReport/National-Energy-Policy.pdf> . Acesso em: ago. 2017.
- VELÁZQUEZ, S. M. S. G. (2006). **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás**. Tese de doutorado. Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- VITAL, M. H. F. (2007). Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, v. 14, n. 28, p. 235-276 Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev2808.pdf)>. Acesso em: mai. 2018.
- WANG, T., SONG, D. W., e CULLINANE, K. P. B. (2002). **The applicability of data envelopment analysis to efficiency measurement of container ports**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/162426577/The-Applicability-of-Data-Envelopment-Analysis-to-Efficiency-Measurement-of-Container-Ports>>. Acesso em: jun. 2017.
- WELCH, E., e BARNUM, D. (2009). Joint environmental and cost efficiency analysis of electricity generation. **Ecological Economics**, 68(8-9), pp. 2336-2343.
- WESTPHAL, F. S., LAMBERTS, R., e CATARINA-BRAZIL, F. S. (2003). **A Methodology to Analyse the Thermal Loads of Non-Residential Buildings Based on Simplified Weather Data**. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August, pp. 11-14.
- WILLIAMSON, Oliver E. (1996). **The politics and economics of redistribution and efficiency**. The mechanisms of governance. New York, Oxford University Press, pp. 195-218.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - WBCSD (2004). **Following up on “Towards a Sustainable Paper Cycle”**. Disponível em: <http://www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=13589&NoSearchContextKey=true>>. Acesso em: jun. de 2015.
- XIMENES, A. R., MERLI, A. G., DE CAMPOS, E. M., e DIAS, J. V. P. P. (2010). O impacto ambiental devido a política de crescimento da frota de veículos. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, 4(2). Disponível em: [sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/download/157/113](http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/download/157/113)>. Acesso em: jan. 2019.

- YEH, T. L., CHEN, T. Y., e LAI, P. Y. (2010). A comparative study of energy utilization efficiency between Taiwan and China. **Energy policy**, 38(5), pp. 2386-2394.
- YUE, Dajun *et al.* Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economic, environmental, and social optimization. **Industrial e Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 10, pp. 4008-4029, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ie403882v>>. Acesso: mai. de 2016.
- ZHANG, S., LUNDGREN, T., e ZHOU, W. (2016). Energy efficiency in Swedish industry: A firm-level data envelopment analysis. **Energy Economics**, 55, pp. 42-51.

## ANEXO



College of Agricultural and Life Sciences  
School of Forest Resources and Conservation



**Projeto: A PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE COMO ALTERNATIVA ENÉGETICA SUSTENTÁVEL NA INDÚSTRIA DE CELULOSE**

**Instituições Participantes:** College of Agricultural and Life Sciences School of Forest Resources and Conservation-University of Florida, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

**Pesquisadora: Fabrícia Gladys F. S. Rossato**

Assistant Professor Production Engineering- Bachelor Federal University of Mato Grosso do Sul-UFMS

fabgladys@gmail.com/ [fabgladys@ufl.edu](mailto:fabgladys@ufl.edu)

**Objetivo:** objetivo é investigar a produção de bioeletricidade como alternativa energética sustentável para a indústria de celulose e a sua contribuição para a matriz energética.

Esta pesquisa aborda discussões sobre a indústria de celulose e a importância do setor elétrico para o crescimento econômico, social e desenvolvimento ambiental de um país. A geração de bioeletricidade é um fator significativo para o desenvolvimento sustentável. Assim, a utilização da bioeletricidade de biomassa de resíduos florestais e licor negro, novo *player* de negócio das indústrias de celulose, pode auxiliar no desenvolvimento sustentável da região onde estão inseridas. A bioeletricidade gerada na produção de celulose é uma alternativa de energia renovável e pode influenciar muitos aspectos da sociedade, do meio ambiente e da economia do país.

O Objetivo da aplicação *survey* é levantar variáveis importantes para que possam ser utilizadas na determinação do índice de eficiência energética na produção de bioeletricidade nas indústrias de celulose no Brasil. A pesquisa garante a integridade dos participantes, sendo vedado a divulgação de nomes, tanto de participantes quanto das organizações. Espera-se com a conclusão da pesquisa, sugerir políticas para favorecer a maximização de produção de bioeletricidade. Esta proposta destina-se a beneficiar a indústria, a sociedade e o setor público.

1. Listar as variáveis que você julga importantes na produção de celulose e eletricidade que são comuns a todas indústrias de celulose.

- Variáveis na Floresta:

- Variáveis na Indústria

- Variáveis de mercado

2. As variáveis listadas são publicadas? Pode sugerir a busca?

3. O que você define como eficiência nas indústrias de celulose:

4. Qual a variável na sua opinião que mais interfere na produção de celulose:

5. Qual a vantagem competitiva do Brasil em relação ao resto do mundo na produção de celulose.

```
. truncreg ic5 firjan reasilvicultura capacidadeinstalada empterceirizados
(note: 0 obs. truncated)
```

```
Fitting full model:
```

```
Iteration 0: log likelihood = 15.097578
Iteration 1: log likelihood = 16.087977
Iteration 2: log likelihood = 16.246685
Iteration 3: log likelihood = 16.246764
Iteration 4: log likelihood = 16.246764
```

```
Truncated regression
```

```
Limit: lower = -inf          Number of obs = 9
       upper = +inf          Wald chi2(4) = 20.94
Log likelihood = 16.246764    Prob > chi2 = 0.0003
```

ic5	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]	
firjan	-1.456746	.3362077	-4.33	0.000	-2.115701	-.7977913
reasilvicultura	.045633	.0137632	3.32	0.001	.0186576	.0726085
capacidadeinstalada	-.0907433	.050551	-1.80	0.073	-.1898215	.0083349
empterceirizados	.1222025	.0418843	2.92	0.004	.0401107	.2042942
_cons	1.791544	.5804285	3.09	0.002	.6539255	2.929163
/sigma	.0397902	.0093786	4.24	0.000	.0214084	.058172

```
. outreg2 using Externalidade.xls, append
Externalidade.xls
dir : seeout
```